

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial

Tesis

**Modelo de jerarquización para determinar el tipo de  
mantenimiento que incremente la disponibilidad  
mecánica de molinos de bolas en Compañía Minera  
Santa Luisa**

Yajayra Amanda Mejia Roque

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniera Industrial

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

**ASESOR**

Ing. Rolando Gamaniel Montalvan Lozano

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Yenny Roque y Germán Mejía, por su apoyo incondicional en todos mis proyectos vida, locuras y decisiones.

A mi hermano Michel Mejía, mi compañero de aventuras, mi confidente y mi guía en este trabajo de investigación.

A mis tíos Christian Meza e Iris Roque y a mis primos Gianpierr y Gianjamil, por su apoyo moral.

A mi asesor, el Ing. Rolando Montalván, por compartir conocimiento y sabiduría en este trabajo de investigación.

## **DEDICATORIA**

A mi abuelo Máximo Roque, que es y será mi modelo a seguir, por sus enseñanzas, dedicación, fortaleza y cariño durante 15 años y aunque no se encuentre en este mundo terrenal, siempre estará presente en mi corazón.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>3</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>8</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>11</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO</b> .....	<b>11</b>
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	11
1.1.1. <i>Planteamiento del problema</i> .....	11
1.1.2. <i>Formulación del problema</i> .....	13
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	14
1.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	14
1.2.2. <i>Objetivo específico</i> :.....	14
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	14
1.3.1. <i>Justificación social</i> .....	14
1.3.2. <i>Justificación técnica</i> .....	14
1.3.3. <i>Justificación económica</i> .....	14
1.3.4. <i>Justificación ambiental</i> .....	15
1.4. HIPÓTESIS Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.....	15
1.4.1. <i>Hipótesis</i> .....	15
1.4.1.1. <i>Hipótesis general</i> .....	15
1.4.1.2. <i>Hipótesis específicas</i> .....	15
1.5. <i>Descripción de variables</i> .....	15
1.5.1.2. <i>Variable independiente</i> .....	15
1.6. <i>Operacionalización de las variables</i> .....	16
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>17</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
2.1. ANTECEDENTE DE LA INVESTIGACIÓN .....	17
2.2. BASES TEÓRICAS .....	22
2.2.1. <i>Selección del modelo de jerarquización (AHP)</i> .....	22
2.2.2. <i>Metodología de mantenimiento</i> .....	32
2.2.3. <i>Análisis funcionales de fallas</i> .....	38
2.2.4. <i>Molino de bolas</i> .....	39
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>43</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>43</b>
3.1. MÉTODO, TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
3.1.1. <i>Método de la investigación</i> .....	43
3.1.1.2. <i>Método analítico</i> :.....	43
3.1.1.3. <i>Método sintético</i> : .....	43
3.1.2. <i>Tipo de investigación</i> .....	44

3.1.3.	<i>Nivel de investigación</i> .....	44
3.1.4.	<i>Diseño de la investigación</i> .....	44
3.1.5.	<i>Población y muestra de la investigación</i> .....	44
3.1.5.1.	Población .....	44
3.1.5.2.	Muestra.....	44
3.1.6.	<i>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</i> .....	44
3.1.6.1.	Técnicas .....	44
3.1.6.2.	Instrumentos.....	45
<b>CAPÍTULO IV</b> .....		<b>46</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>46</b>
4.1.	RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	46
4.1.1.	<i>Historial de disponibilidad mecánica</i> .....	46
4.1.2.	<i>Proceso analítico jerárquico</i> .....	47
4.1.2.1.	Descomposición del problema.....	48
4.1.2.2.	Ponderación de la matriz de criterios .....	49
4.1.2.3.	Normalización de la matriz de criterios .....	49
4.1.2.4.	Comparación de alternativas .....	52
4.1.2.5.	Comparación y decisión de la mejor alternativa .....	53
4.1.2.6.	Evaluación de consistencia .....	54
4.1.3.	<i>Aplicación de la metodología RCM</i> .....	57
4.2.	PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	65
4.2.1.	<i>PRUEBA DE NORMALIDAD</i> .....	66
4.2.2.	<i>Prueba T para muestras relacionadas</i> .....	67
4.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	69
<b>CONCLUSIONES</b> .....		<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....		<b>71</b>
<b>ANEXOS</b> .....		<b>74</b>
CRONOGRAMA .....		75
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....		76
EVIDENCIAS.....		78

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 01. NÚMERO DE HORAS DE PARADA POR REPARACIONES MECÁNICAS (16/07/2020).....	12
FIGURA 02. DISPONIBILIDAD MECÁNICA DE TODOS LOS MOLINOS – JULIO 2020 (PROMEDIO 82%).....	12
FIGURA 03. MATRIZ CUADRADA DE NXN .....	25
FIGURA 04. MATRIZ DE COMPARACIONES PAREADAS .....	25
FIGURA 05. MATRIZ DE PRIORIDADES DE “M” CRITERIOS Y “N” ALTERNATIVAS.....	27
FIGURA 06. MATRIZ DE PRIORIDADES GLOBALES.....	27
FIGURA 07. MATRIZ NORMALIZADA 1 .....	28
FIGURA 08. MATRIZ NORMALIZADA 2 .....	28
FIGURA 09. MATRIZ PERFECTAMENTE CONSISTENTE .....	29
FIGURA 10. PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO .....	34
FIGURA 11. FACTORES DE MANTENIMIENTO .....	34
FIGURA 12. CORTE TRANSVERSAL DE UN MOLINO DE BOLAS. ....	39
FIGURA 13. MOLINO DE BOLAS.....	40
FIGURA 14. DISPONIBILIDAD MENSUAL.....	46
FIGURA 15. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA .....	58
FIGURA 16. PRUEBA DE MUESTRAS EMPAREJADAS .....	68
FIGURA 17. DISPONIBILIDAD MENSUAL DURANTE EL TIEMPO DE ESTUDIO .....	69



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 01. ESCALA DE PREFERENCIAS.....	23
TABLA 02. ÍNDICE DE CONSISTENCIA ALEATORIA .....	30
TABLA 03. ESCALA NUMÉRICA FUNDAMENTAL PARA COMPARACIONES POR PARES .....	32
TABLA 04. ESCALA DE THOMAS SAATY .....	47
TABLA 05. DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS EVALUAR .....	48
TABLA 06. MATRIZ DE PONDERACIÓN DE CRITERIOS .....	50
TABLA 07. NORMALIZACIÓN DE LA MATRIZ DE CRITERIOS (EVALUACIÓN DE FALLAS) .....	50
TABLA 08. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS – CRITERIO C2 .....	52
TABLA 09. MATRIZ NORMALIZADA – CRITERIO C2 .....	52
TABLA 10. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS – CRITERIO C6 .....	53
TABLA 11. MATRIZ NORMALIZADA – CRITERIO C6 .....	53
TABLA 12. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS MODELO PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO.....	54
TABLA 13. EVALUACIÓN DE CONSISTENCIA – CRITERIO 2.....	54
TABLA 14 EVALUACIÓN DE CONSISTENCIA – CRITERIO 6.....	56
TABLA 15. FALLAS PRINCIPALES Y SECUNDARIAS .....	58
TABLA 16. MODOS DE FALLOS .....	59
TABLA 17. ANÁLISIS DE CRITICIDAD .....	60
TABLA 18. MEDIDAS PREVENTIVAS .....	61
TABLA 19. FICHA DE MANTENIMIENTO - MOLINOS .....	62
TABLA 20. CHECK LIST – MOLINOS .....	63
TABLA 21. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO-MARZO 2021 .....	64
TABLA 22. RESUMEN DE PROCESAMIENTO DE CASOS .....	66
TABLA 23. DESCRIPTIVOS.....	66
TABLA 24. PRUEBAS DE NORMALIDAD.....	67
TABLA 25. NORMALIDAD .....	67
TABLA 26. PRUEBA “T” .....	68
TABLA 27. CORRELACIÓN .....	68
TABLA 28. MUESTRAS RELACIONADAS .....	68

## RESUMEN

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en la planta concentradora de la Minera Santa Luisa, ubicada en la localidad de Huanzalá, distrito de Huallanca, provincia de Bolognesi y departamento de Ancash, posee diversos equipos críticos, siendo objeto de este estudio los molinos de bolas, los cuales están compuestos por sistemas de transmisión eléctrica, lubricación, *inching drive* (auxiliar), carga y descarga.

El problema en que nos enfocamos son las paradas inesperadas que conllevan al decrecimiento de disponibilidad mecánica de los aparatos en cuestión. Esta investigación es de tipo básico y nivel descriptivo, ya que se determinó las fallas recurrentes del sistema mecánico, para luego hacer un análisis de las mismas (AMEF). Mediante la matriz AHP se pudo determinar que la metodología RCM es el mantenimiento ideal para este tipo de fallas, el cual mediante mejora continua permitió el incremento de disponibilidad.

**Palabras clave:** Molino de bolas, disponibilidad, fallas, metodología RCM y matriz AHP

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se refiere a la aplicación de un modelo de jerarquización que permita determinar el tipo de mantenimiento a aplicarse en un molino de bolas, con la finalidad de incrementar su disponibilidad mecánica en la compañía Minera de Santa Luisa.

La mencionada empresa minera cuenta con molinos de bolas como equipo principal de la planta, específicamente en el área de molienda, procesando alrededor del 75 % del mineral. Por otra parte, la tasa de fallas del equipo es alta, no existe un plan de mantenimiento adecuado con la finalidad de controlar su disponibilidad y, por ende, su productividad. Contar con tal plan es esencial, tanto por cuestiones operativas como económicas. Podemos agregar a esto que la compañía no cuenta con ningún tipo de registros de equipos, manuales o fuentes de fabricante (debido a la antigüedad de los equipos y la planta concentradora).

En la primera fase del plan de mantenimiento, se llevó a cabo la recopilación de registros del historial de fallas, así como los datos de fábrica para extrapolarlos a la fábrica de la empresa. Entonces este hecho de análisis de fallos y criticidad permite definir los componentes clave del equipo, además de ser el punto de partida para remediar la situación contraproducente de no contar con un adecuado plan de mantenimiento.

La presente tesis está referida a la aplicación de un modelo de Jerarquización AHP, con la finalidad de seleccionar un adecuado sistema de mantenimiento que nos permita determinar la disponibilidad del molino de bolas.

YAJAYRA MEJIA

## **CAPÍTULO I**

### **1. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

#### **1.1. Planteamiento y formulación del problema**

##### **1.1.1. Planteamiento del problema**

La Compañía Minera Santa Luisa está ubicada en el departamento Ancash de la provincia de Bolognesi, distrito de Huallanca, provincia de Bolognesi, Departamento de Huaraz, los minerales que extrae incluyen plomo, cobre y zinc. Esta unidad minera ha estado en operación continua durante 51 años, lo que significa que muchos equipos de la planta concentradora están en constante desgaste, siendo el área que presenta más desgaste la de molienda, la cual consta de 5 molinos de bolas de 9x11 (1), 8x11 (1) y 8x3 (2) y 9<sup>1</sup>/<sub>2</sub>x14 (1) diámetro x largo en pies.

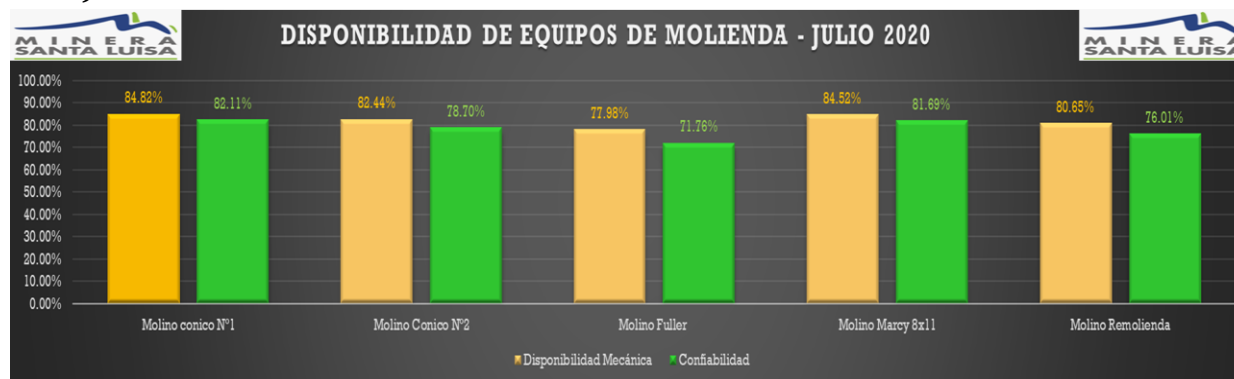
En la planta concentradora de la Minera Santa Luisa desde el 2018 se ha estado tomando en cuenta el indicador de disponibilidad de todos los equipos grandes, en este caso del molino de bolas, diariamente se toma el número de horas de parada sobre las horas planificadas.

**Figura 01. Número de horas de parada por reparaciones mecánicas (16/07/2020)**

N.º HORAS DE PARADA – 16/07/2020									MINERA SANTA LUISA	
2.-	MOLIENDA	Horometro Inicial	Horometro Final	Horas Programadas	Horas de Parada de Equipo			Horas Trabajadas	Observaciones	
					Hrep.mec	Hrep.elec	H.oper			
2.1	Molino conico Nº1			24.00	7.00	0.00	0.00	17.00		
2.2	Molino Conico Nº2			24.00	0.00	0.00	0.00	24.00		
2.3	Molino Fuller			24.00	10.50	0.00	0.00	13.50		
2.4	Molino Marcy 8x11			24.00	0.00	0.00	0.00	24.00		
2.5	Molino Remolienda			24.00	9.50	0.00	0.00	14.50		
Sub total horas				120.00	27.00	0.00	0.00	93.00		
Disponibilidad mecánica de molienda planta				77.50%						

Fuente: Minera Santa Luisa

**Figura 02. Disponibilidad mecánica de todos los molinos – julio 2020 (Promedio 82 %)**



Fuente: Minera Santa Luisa

Entre agosto del 2020 y julio del 2021, mediante un AMEF se identificó fallas mecánicas en los molinos, como desalineamiento de eje, desgaste de piñon de ataque, desprendimiento de forros metálicos, recalentamiento de casquillos, desgaste de catalina, contaminación de aceite, perforación de mallas del tromel, desgaste de *spout feeder*, perforación de trunion y vibración excesiva en el eje, generando tales desperfectos una serie de paradas imprevistas, lo cual afectaba directamente a la disponibilidad de la planta concentradora.

La investigación desarrollada tomó de referencia a la tesis: «Modelo de jerarquización de equipos en función de su criticidad aplicado a un sistema tranviario», realizada en la Universidad Azuay-Ecuador (Astudillo, y otros, 2016). Tal investigación cimentó nuestro

estudio, puesto que consideramos el modelo de jerarquización AHP propuesto, de modo que se logró construir las matrices AHP con las fallas más probables de los molinos y con los tipos de mantenimiento existentes.

De igual forma la tesis titulada: «Diseño de un plan de Mantenimiento para un Molino de Bolas de la Empresa Compañía Minera Cerro Negro S.A», realizado en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Chile. (Rodríguez, 2018). De esta investigación se tomó como ejemplo la estructura AMEF, para luego desarrollar una ficha propia donde se identifica las fallas correspondientes a los molinos de la Minera Santa Luisa.

Teniendo como referencia los antecedentes mostrados, se desarrolló el análisis de fallas (AMEF) en los molinos de bolas, específicamente en su sistema mecánico, para luego realizar un modelo de jerarquización de fallas y tipos de mantenimiento mediante matrices AHP.

### **1.1.2. Formulación del problema**

¿Cuál es el modelo de jerarquización para determinar el tipo de mantenimiento que mejore la disponibilidad de los molinos de bola en la Compañía Minera Santa Luisa?

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

Determinar el Modelo de jerarquización para obtener el tipo de mantenimiento que incremente la disponibilidad de los molinos de bola en la Compañía Minera Santa Luisa.

### **1.2.2. Objetivo específico:**

- Seleccionar la metodología de mantenimiento
- Evaluar las fallas del molino de bolas
- Determinar la mejora de disponibilidad

## **1.3. Justificación e importancia**

### **1.3.1. Justificación social**

Este trabajo de investigación es favorable para la sociedad, porque la aplicación del modelo nos permite seleccionar el tipo de mantenimiento, a través del cual es factible el incremento de la disponibilidad mecánica del molino de bolas, de manera que se beneficie a la empresa y al colectivo social inmerso.

### **1.3.2. Justificación técnica**

Esta investigación considera al molino de bola para su evaluación correcta y determinar su disponibilidad mecánica con base en mejora en su proceso de mantenimiento.

### **1.3.3. Justificación Económica**

La disponibilidad mecánica del molino de bola en la Compañía Minera Santa Luisa nos permitirá obtener una mejor producción y por lo tanto mayor utilidad.

### **1.3.4. Justificación ambiental**

Cuando hay fallas en los linner hay derrames de pulpa de concentrado y se producen daños al medioambiente.

## **1.4. Hipótesis Y Descripción De Variables**

### **1.4.1. Hipótesis**

#### **1.4.1.1. Hipótesis general**

Si, elaboramos el modelo de jerarquización para obtener el tipo de mantenimiento permitirá incrementar la disponibilidad mecánica del molino de bolas en la Compañía Minera Santa Luisa.

#### **1.4.1.2. Hipótesis específicas**

- Seleccionando la metodología de mantenimiento mediante la matriz AHP se podrá identificar la jerarquía de tipos de mantenimiento.
- Evaluando las fallas de los molinos de bolas se podrá definir una jerarquización de fallas desde el más crítica hasta el menos crítico.
- Determinando la mejora de la disponibilidad se logrará un crecimiento del 15 %

## **1.5. Descripción de variables**

### **1.5.1.1. Variable dependiente**

- Disponibilidad Mecánica

### **1.5.1.2. Variable independiente**

- Tipo de Mantenimiento



### 1.6. Operacionalización de las variables

VARIABLE	DEFINICIÓN	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Tipo de Mantenimiento	El mantenimiento se refiere a las actividades que deben realizarse en una secuencia lógica para que los equipos de producción y otras propiedades físicas en las diversas ubicaciones de la empresa se mantengan en condiciones de trabajo eficientes, seguras y económicas, lo cual se divide en varios tipos.	KPI'S	Desempeño, rendimiento y actividades
Disponibilidad Mecánica	Es la capacidad de una unidad funcional para estar en condiciones de realizar una función requerida bajo condiciones específicas en un momento dado o durante un período de tiempo, asumiendo que los recursos externos necesarios están disponibles.	Porcentaje	$D = \frac{\text{(Tiempo de producción real)}}{\text{(Tiempo de producción posible)}}$

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedente de la Investigación**

En los siguientes antecedentes se muestra algunos estudios, tanto internacionales como nacionales y regionales con respecto al tema de tesis:

La tesis titulada «Modelo de jerarquización de equipos en función de su criticidad aplicado a un sistema tranviario», realizada en la Universidad Azuay-Ecuador, señala que en la actualidad la globalización de los mercados ha forzado a las compañías a desarrollar sus niveles de competitividad y productividad a través de la implementación de procesos, planes y técnicas que admitan gestionar de forma apropiada todos sus recursos. En las empresas se considera como zona estratégica el área de mantenimiento, ya que tiene relación directa entre productividad y disponibilidad de equipos e instalaciones. Para el sistema de transporte, el área de mantenimiento se relaciona con la comodidad y seguridad de los usuarios.

Acerca de la tesis titulada «Diseño de un plan de Mantenimiento para un Molino de Bolas de la Empresa Compañía Minera Cerro Negro S.A», realizado en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso – Chile, la investigación aporta el estudio del mantenimiento para determinar las fallas y su disponibilidad mecánica. En la primera parte del plan de mantenimiento se realizó la compilación de datos trascendentales de fallas de un molino análogo, que tiene la finalidad de comparar los datos del molino de la compañía

minera. Seguidamente, se elaboró un análisis de falla y criticidad, con la finalidad de precisar los factores críticos del molino. Finalmente, se empleó el modelo de *Weibull* a los factores críticos para diagnosticar la tasa de falla, la curva de confiabilidad y el MTBF, parámetros importantes para el progreso del proceso de mantenimiento.

Además, en el artículo titulado «Determinación de las ponderaciones de los criterios de sustentabilidad hidroeléctrica mediante la combinación de los métodos AHP y GP extendido» se señala que los proyectos hidroeléctricos en México presentan inconvenientes sociales y ambientales, lo cual ocasiona retrasos en la operación o construcción. Entonces el estudio se dedicó a definir los análisis de los criterios de sostenibilidad hidroeléctrica, a través de tácticas multicriterio de toma de decisiones, realizado con un grupo de expertos. Con base en la unificación de dos tácticas multicriterio: Proceso Analítico Jerárquico y la Programación por Metas, se obtuvo la opinión de expertos en el planeamiento de proyectos hidroeléctricos. Después de aplicar la unificación de los métodos AHP-GP, finalmente, se consiguió sopesar las perspectivas de sostenibilidad de la hidroeléctrica, teniendo como conclusión tomar como pilar la opinión del grupo de expertos de gobernanza.

En el artículo titulado «Aplicación de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicio de expertos» se afirma que para obtener resultados con juicio de expertos, una de las técnicas más certeras de la búsqueda de operaciones es la teoría de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para conseguir una considerable precisión en el análisis de toma de decisiones complejas, para lo cual se aplicaron los siguientes pasos: Primero, verificación de pasos de la técnica AHP mediante el juicio de expertos. Segundo, aplicación del método de priorización utilizando la media geométrica, para comprobar, tomar y aumentar la cota de consenso de grupo a través de esta técnica de decisión. Finalmente, se obtiene un esquema desarrollado en un caso práctico en el sector de logística industrial, obteniendo resultados positivos, los cuales señalan su aplicabilidad y efectividad dentro del campo de la Teoría de decisiones.

En el artículo titulado «Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, bases de datos y criticidad de efectos» se plantea una metodología de RCM aumentada que incluye pasos añadidos tales como: compilación de información, empleo de la norma ISO 14224 para asemejar la información del equipo, empleo de bases de datos «OREDA» para las causas de falla y la evaluación de efectos de falla para determinar los números de prioridad de riesgo (NPR) y jerarquizar las fallas. Finalmente, se logró mostrar y estudiar un caso de aplicación de la metodología propuesta.

Luego, en la tesis titulada «Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para el Molino de Bolas Kurimoto 8'x6' en la Unidad Minera Catalina Huanca», se propone acrecentar la seguridad de los equipos, también propone impedir el excesivo manejo de las horas extras de mantenimiento, además de las repetidas alarmas, fallas y detenciones de los equipos. Por lo cual predominará de forma directa en la productividad de la empresa.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (CCM) es un método desarrollado en la industria aeroespacial de principios de la década de 1960 para mejorar las técnicas de mantenimiento, ya sea preventivo, predictivo o correctivo.

Este método es suficientemente simple y se orienta a la aplicación de una manera de mantenimiento a un modo de falla determinado. Este trabajo describe el molino de bolas Kurimoto 8'x6' y lo divide en subsistemas para así poder referir individualmente la falla de cada uno de ellos y cómo afecta en su maniobra.

Como análisis final se obtuvo un análisis MCC, el cuál fue presentado para luego ser realizado en los futuros proyectos de mantenimiento del área de molienda de la planta concentradora de la Unidad Minera Catalina Huanca.

En la tesis titulada «Optimización del Mantenimiento en el Cambio de los Forros en el Molino Fuller de la Empresa Southern Perú – Toquepala – 2015» señala que tiene como intención optimizar el ciclo de cambio de chaquetas del molino Fuller para la lanta de molienda en la Empresa Southern Perú, a través de la empresa Contratista SEPERSUR S. R.

L. Por ende, se analizó las diferentes peculiaridades de los materiales; cuantificaciones de los ciclos de tiempo y funcionamiento; después de realizar la elaboración de una metodología de diseño y distinción de compendios de un equipo.

Considerando que el mantenimiento productivo total (MPT) tiene como objetivo incrementar la actividad del equipo para optimizar su vida útil y su economía, pretende implicar a todas las áreas que realizan planeamiento, diseño, utilizan o conservan los dispositivos, acrecentar la mantenibilidad y la confiabilidad del equipo para luego subvencionar a la calidad de los productos, incrementar la productividad y fomentar las actividades autónomas de grupos.

En vista de los retrasos de transmisiones fuera del cronograma determinado y estipulado con los clientes, se genera sanciones que perturban con fuerte impacto al presupuesto. Hasta la actualidad, la inexactitud de técnicas de calidad y productividad han causado pérdidas por la inadecuada atención en la forma de implementar y organizar una mejora continua durante el desarrollo, como la falta de vigor de los sistemas de calidad referente a la inspección en los métodos de desarrollo de disposición, operación e ingeniería de un molino de cemento o cualquier otra área.

En la tesis «Optimización de los Sistemas de Control de un Molino de Bolas» se menciona que el tonelaje de procesamiento y la calidad del mineral del molino de bolas están sujetos a las siguientes causas: primero, es la carga del molino de bolas; segundo, el tipo de la bola cargada, y por último la relación de carga, es decir, el volumen de mineral y el porcentaje en peso además de que es imperativo un buen mantenimiento, debido a que el proceso de molienda requiere el mayor consumo de energía, además se le atribuye la calidad del proceso de flotación y extracción de minerales.

En la tesis titulada «Estudio Comparativo del Molino SAG 40 ft x 25 ft y el Molino Convencional de Bolas 26 ft X 40 ft en la Compañía Antapaccay» se tiene como objetivo el estudio y la determinación del molino SAG y el molino de bolas convencional, basándose en la

confiabilidad de los caparzones de acero que simbolizan estos en función de las supervisiones habituales que se ejecuta en cada detención de mantenimiento dentro de la planta concentradora, luego se lanzan los resultados que el molino SAG de la campaña 04 (Aceros Cuyanos – ACSA) alcanzó, con un desempeño relativamente favorable, presentando una confiabilidad al 50 % de posibilidad de durabilidad del revestimiento hasta un tonelaje universal de 14.5 millones de toneladas, estimando un criterio de KPI´s (Indicador de meta para cumplimiento) de conseguir los 16 millones de toneladas de mineral procesado.

La tesis titulada «Propuestas de mejora para el proceso de cambio de revestimientos para el molino de bolas en el área de concentradora en una empresa minera, Arequipa, 2018» señala que, en el sector minero, en nuestro país, se realizan continuamente mejoras o cambios según las operaciones realizadas y según los equipos utilizados, con la finalidad de incrementar la productividad y a su vez reducir costos. Para este caso de los molinos de bolas monitoreados en grandes plantas concentradoras, lo que se busca es un óptimo mantenimiento en los cambios de chaquetas, pues se requiere asegurar su funcionamiento y conservación.

En una planta concentradora en el entorno de empresas de gran minería, normalmente se tiene un tonelaje de producción de 140,000 toneladas por día de mineral aproximadamente, siendo que el cambio de lanners es una actividad que se realiza indispensablemente de manera periódica (trimestralmente) en cada molino; cabe resaltar que ésta actividad no perjudica a la producción, pero si podría optimizarse economizando costos a la empresa minera, por lo que el propósito es diseñar propuestas de mejora para el desarrollo de cambio de lanners para el molino de bolas en el área de molienda en la planta concentradora en una empresa minera.

En la primera parte se teoriza y explica el proceso del cambio de lanners de los molinos de bolas, demostrando los procedimientos del mismo, también se muestra la descripción del proceso de cambio de lanners por la parte operativa. Seguidamente, se hace el análisis y diseño de la solución planeada, mostrando el diagnóstico obtenido para el área de molienda en la

planta concentradora en mina y de la operación del cambio de linnners dentro de los molinos de bolas, examinando su problemática, disponiendo los requerimientos y planteando las mejoras.

Finalmente, en la tesis titulada «Análisis de Fallas del Molino de Bolas 20'x30' para Propuesta de Plan de Mantenimiento Preventivo en Planta Concentradora del Brocal», se propone que siendo una de las compañías que aplica gran minería en la región Pasco, posee diversos equipos críticos, siendo uno de ellos el molino de bolas NCP 20'x30' que presenta sistemas como el eléctrico, de lubricación, de transmisión, carga y descarga e *inching drive* como auxiliar.

Se hace referencia en la problemática de las horas de paro no planificadas, según los registros se toma hasta 27 horas sin ser intervenidos, para luego nuevamente operar el molino. Además, se determinó las fallas reiteradas de los sistemas que constituyen este equipo, teniendo como finalidad ejecutar el análisis de estas para el molino 20'x30' y formular un plan de mantenimiento preventivo. Obteniendo como resultado una formulación del plan de mantenimiento preventivo del molino de bolas basándose en la metodología del AMEF, que nos da a conocer los modos de falla, causas y efectos; con ello se propone las actividades a ejecutar en el programa de mantenimiento que a mediano plazo servirá para disminuir las horas de paro no incluidas en el programa.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Selección del modelo de jerarquización (AHP)**

Según García (2010), el proceso de análisis jerárquico (AHP), se desarrolló como una propuesta por el matemático Thomas L. Saaty en la década de 1970. Es un sistema que posibilita organizarse de forma gráfica y eficiente, además de descomponer y analizar información sobre temas de toma de decisiones. Parcialmente, se visualiza y sintetiza los efectos de los cambios de nivel.

Este método solicita que la persona que toma decisiones nos proporcione una evaluación subjetiva de la importancia relativa de cada criterio que defina y luego especifique su preferencia para cada decisión alternativa y por cada criterio.

Según Saaty (2008), el AHP específicamente trata de desglosar un problema en pequeños subproblemas con el objetivo de fusionar todos los resultados en una sola conclusión.

**a. Fundamento matemático del AHP:** Saaty (2008), en el desarrollo analítico jerárquico expone el siguiente principio matemático.

**b. Establecimiento de prioridades:** El procedimiento analítico jerárquico requiere que la toma de decisiones instaure una preferencia o antelación para cada uno de los dilemas de determinación de términos de la extensión en la que coopera con cada criterio. Una vez instaurada la prioridad o preferencia, se sintetiza la data y se facilita una subordinación de la importancia de las opciones, en términos de la predilección universal.

**c. Comparaciones pareadas:** A fin de efectuar relaciones, es imperativo requerir una progresión numérica que señale en cuantas ocasiones es dominante o significativo un componente para otro acerca de la norma sobre la cual se está haciendo la comparación. El procedimiento analítico jerárquico utiliza una escala con valores del 1 al 9, tal como se muestra en la Tabla 01.

**Tabla 01. Escala de preferencias**

INTENSIDAD	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo.
3	Templada importancia	La práctica y el juicio ayudan tenuemente a una actividad sobre otra.



5	Fuerte categoría	La rutina y el juicio benefician tenuemente a una acción sobre otra.
7	Muy fuerte importancia o importancia demostrada	Un movimiento está mucho más mejorado que otro; su potestad se declaró en la práctica.
9	Extrema importancia	La seguridad que beneficia una diligencia sobre otra tiene la disposición más alta y viable respecto a la aseveración.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Categoría media entre juicios contiguos.
Recíprocos de los anteriores	Si la función $i$ tiene alguno de los valores anteriores distintos de cero en relación con la función $j$ , entonces $j$ es inversa en relación con la función $i$ .	
1.1 – 1.9	Si las actividades son muy cercanas	Determinar el mejor valor puede ser difícil, pero en comparación con otras características opuestas, el tamaño de los números pequeños no importaría mucho, pero aun así pueden indicar la importancia relativa de las características.

Fuente: Saaty (2008)

**d. Matriz de comparaciones pareadas:** La matriz de comparaciones pareadas se refiere a una matriz cuadrada que comprende comparaciones pareadas de los criterios o alternativas. Según Toskano (2005), se define como: «Sea  $A$  una matriz  $n \times n$ , donde  $n \in \mathbb{Z}^+$ . Sea  $a_{ij}$  el elemento  $(i, j)$  de  $A$ , para  $i = 1, 2, \dots, n$ , y,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Decimos que  $A$  es una matriz de comparaciones pareadas de  $n$  alternativas, si  $a_{ij}$  es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón  $i$ , cuando se le compara con la alternativa de la columna  $j$ . Cuando  $i = j$ , el valor de  $a_{ij}$  será igual a 1, pues se está comparando la alternativa consigo misma».

**Figura 03. Matriz cuadrada de nxn**

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Fuente: Toskano

Además, se cumple que:  $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$ ;

**Figura 04. Matriz de comparaciones pareadas**

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Fuente: Toskano

García (2010), refiere al proceso analítico jerárquico que mantiene con los siguientes axiomas:

- Axioma 1 (Reciprocidad): Siendo «A» una matriz de comparaciones pareadas se cumple que  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ .
- Axioma 2 (Homogeneidad): Cada elemento debe compararse y debe ser de la misma jerarquía y orden de magnitud, es decir, la persona que decide nunca debe juzgar a un postulado como infinitamente superior a otro postulado, bajo ningún criterio.

- Axioma 3 (Dependencia): Existen los problemas de toma de decisión que pueden ser enunciados como una jerarquía, es decir, que existe una vinculación de jerarquía entre los componentes de dos niveles consecutivos.
- Axioma 4 (Expectativas): Finalmente, se debe tener expectativas que deben estar representadas en la jerarquía en términos de alternativas y criterios.

**e. Sinterización de juicios:** Según Toskano (2005), la sinterización de opiniones se desarrolla con el fin de instaurar la prioridad para cada uno de los compendios, los cuales se cotejan en la matriz de comparación por pares. Se concluye que el asunto matemático para ejecutar la simplificación comprende el cálculo de los vectores y valores que los caracteriza, lo cual se consigue a través de la siguiente manera:

**Paso 1:** Se requiere sumar cada uno de los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas.

**Paso 2:** Luego, dividir cada elemento de la matriz entre el total de su columna; seguidamente, a la matriz resultante se le denominará matriz de comparaciones pareadas normalizada.

**Paso 3:** Finalmente, se debe calcular el promedio de cada uno de los elementos de cada renglón de las prioridades relativas de los elementos que se comparan.

**f. Matriz de prioridades:** La matriz de prioridades realiza un resumen de las prioridades para cada alternativa en términos de cada criterio. Para  $m$  criterios y  $n$  alternativas se tiene que:

**Figura 05. Matriz de prioridades de «m» criterios y «n» alternativas**

	Criterio 1	Criterio 2	...	Criterio m
Alternativa 1	$P_{11}$	$P_{12}$	...	$P_{1m}$
Alternativa 2	$P_{21}$	$P_{22}$	...	$P_{2m}$
...	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
Alternativa n	$P_{n1}$	$P_{n2}$	...	$P_{nm}$

Fuente: Toskano

Donde  $P_{ij}$  es la prioridad de la alternativa  $i$  con respecto al criterio  $j$ , para  $i = 1, 2, \dots, n$ ; y  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Entonces, la prioridad universal para cada una de las alternativas de las decisiones se resume en el vector columna que es el resultado del producto de la matriz de prioridades con el vector de prioridades de los criterios.

**Figura 06. Matriz de prioridades globales**

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_{1} \\ P'_{2} \\ \vdots \\ P'_{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gn} \end{bmatrix}$$

Fuente: Toskano

Donde  $P_{gi}$  es considerado como la prioridad global (respecto a la meta global) de la alternativa  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

**g. Consistencia:** Es la medición del grado de consistencia de las opiniones que vierte la persona que toma las decisiones durante las comparaciones pareadas. Es significativo

porque le posibilita entender si debe proseguir con el proceso de decisión o debe reconsiderar o modificar sus opiniones.

De forma matemática, se expone que una matriz de comparación «A» nxn es consistente si:  $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ , para  $i, j, k = 1, 2, \dots, n$ .

Para definir si una matriz de consistencia es o no viable y razonable, se debe de desarrollar una medida para la matriz de comparación A de orden nxn.

Manifestamos que si la matriz «A» es perfectamente consistente se producirá una nueva matriz «N» de orden nxn normalizada (es decir que conmuta con su transpuesta) de elementos  $w_{ij}$  (para  $i, j = 1, 2, \dots, n$ ), tal que todas las columnas son idénticas, es decir,  $w_{12} = w_{13} = \dots = w_{1n} = w_1$ ;  $w_{21} = w_{23} = \dots = w_{2n} = w_2$ ;  $w_{n1} = w_{n2} = \dots = w_{nn} = w_n$

**Figura 07. Matriz Normalizada 1**

$$N = \begin{bmatrix} w_1 & w_1 & \dots & w_1 \\ w_2 & w_2 & \dots & w_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n & w_n & \dots & w_n \end{bmatrix}$$

Fuente: Toskano

Si se dividen los elementos de la columna  $i$  entre  $w_i$ , entonces se tiene que:

**Figura 08. Matriz normalizada 2**

$$A = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Fuente: Toskano

Según la definición de «A», se tiene que:

**Figura 09. Matriz perfectamente consistente**

$$\begin{bmatrix} 1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & 1 & \dots & W_2/W_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nW_1 \\ nW_2 \\ \vdots \\ nW_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}$$

Fuente: Toskano

Esto quiere decir que la matriz «A» es consistente si y solo si:

$$AW = nW$$

Donde  $W$  se refiere a un vector columna de valores relativos  $w_i$ , ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) que se aproxima al sacar el promedio de los «n», elementos del renglón en la matriz normalizada  $N$ . Haciendo  $W'$ , el estimado calculado, se puede mostrar que:

$$AW' = n_{\max} W'$$

Donde  $n_{\max} \geq n$ . Para esta ocasión, entre más aproximado sea  $n_{\max}$  a  $n$ , nos dará como resultado una matriz de comparación «A» más consistente. Por consiguiente, en el proceso de análisis jerárquico, se calculará la razón de consistencia como:

$$RC = IC / IA$$

Donde IC es el índice de consistencia de «A» y se calcula de la siguiente manera:

$$IC = n_{\max} - n / n - 1$$

El valor de  $n_{max}$  se resuelve al calcular primero el vector columna «A» y luego al sumar cada uno de los elementos. El índice de consistencia aleatoria de A (IA) depende de la cantidad de los elementos que se comparan y puede admitir los siguientes valores:

**Tabla 02. Índice de Consistencia Aleatoria**

N° de elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio de consistencia (IA)	0	0	0.58	0.89	1.11	1.24	1.32	1.40	1.45	1.49

Fuente: Toskano (2005)

Se muestra que el valor de la razón de consistencia (RC) sobrepasa el valor de 0.10, se estima como un juicio inconsistente entre las relaciones pareadas; para estos casos interviene la persona encargada de tomar decisiones, quien debe reanalizar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas.

Cuando el valor de la razón de consistencia (RC) no sobrepasa el valor de 0.10, se estima como un juicio razonable de consistencia en las comparaciones pareadas.

**h. Esquema metodológico del AHP:** Según Bacalla (2014), en el proceso de análisis jerárquico se aclara fundamentalmente las siguientes etapas: Estructuración jerárquica del problema, valoración de elementos, priorización y síntesis. Seguidamente se describe cada una de estas etapas:

**Estructuración jerárquica del problema:** Es la primera fase y la más importante en la utilización del AHP, en esta fase se busca la segregación del problema en pequeños elementos importantes, los cuáles son: meta global u objetivo general, criterios y alternativas de decisión.

Para constituir el modelo jerárquico se deben de desarrollar los siguientes pasos: identificación del problema, definir el objetivo, identificar los criterios e identificar las alternativas. Según Toskano (2005):

Se realiza el reconocimiento del problema según la situación que se requiere solucionar, el objetivo y meta general manifiesta la determinación de la aplicación del AHP, cada uno de los criterios son las prioridades que la agrupación que toma las decisiones que afectan considerablemente al objetivo y meta en general y las diferentes opciones de las decisiones son las propuestas factibles que admite obtener dicho objetivo y meta general. Es de gran provecho la utilización de una gráfica nombrada como árbol de jerarquías para explicar el problema de decisión en términos del objetivo y la meta general los criterios y las alternativas.

***Evaluación de elementos:*** Es la segunda fase donde cada uno de los miembros de la agrupación de toma de decisiones tendrá que emitir sus juicios de valor o predilección por cada uno de los niveles jerárquicos que se ha instaurado. Para ejecutar esta labor es imprescindible realizar una comparación «por pares» tanto para los criterios, así como para las alternativas de decisión con el objetivo de conocer y medir sus prioridades respecto a estos componentes, el AHP posibilita realizar estas semejanzas basándose en factores cuantitativos (aquellos que se consiguen medir en métodos numéricos, tales como fichas científicas o estadísticas) y cualitativos (aquellos que no se calculan en requisitos numéricos, tales como la experiencia o el conocimiento). A fin de efectuar estas comparaciones «por pares», Saaty (2008) decretó una escala numérica elemental para la comparación por pares que señala cuantas veces más dominante o importante es un elemento sobre otro con respecto a una propiedad o criterio sobre el cual se está haciendo la comparación. Esta escala se presenta en la Tabla 3.



**Tabla 03. Escala numérica fundamental para comparaciones por pares**

Intensidad	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente a una actividad sobre otra
5	Fuerte importancia	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente a una actividad sobre otra
7	Muy fuerte importancia o importancia demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su dominio se demostró en la práctica.
9	Extrema importancia	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es del orden más alto posible de la afirmación.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Importancia intermedia entre juicios adyacentes
Recíprocos de los anteriores	Si una actividad $i$ tiene uno de los valores no nulos anteriores asignados a él cuando se compara con una actividad $j$ , entonces $j$ tiene el valor recíproco cuando se compara con $i$ .	
1.1 – 1.9	Si las actividades son muy cercanas	Puede ser difícil asignar el mejor valor pero cuando se compara con otras actividades contrastantes el tamaño de

Fuente: Saaty (2008)

**Priorización y síntesis:** Seguidamente, se desarrolla la integridad de cotejos «por pares», se consigue un ordenamiento de las opciones desde la mejor hasta la peor basándose en la emisión de juicios de valor realizado por medio de una cotejo de los componentes del modelo jerárquico realizado por los expertos.

**i. Análisis de sensibilidad:** El análisis de sensibilidad posibilitará la visualización y análisis del problema resultado con respecto de los probables cambios en la prioridad de los criterios.

### **2.2.2. Metodología de mantenimiento**

Gómez L. (2007), sostiene que:

El mantenimiento es la asociación de actividades que deben efectuarse a equipos e instalaciones, con el fin de localizar, subsanar o precaver los problemas causados por las fallas latentes de las funciones de un equipo o

máquina a fin de afianzar que una instalación, una máquina, sistema industrial u otro activo fijo continúen desarrollando las funciones para las que fueron concebidas prolongando la capacidad y la calidad especificadas. En la actualidad el mantenimiento industrial se encuentra en un gran apogeo, y que además no sólo implica al grupo operativo de mantenimiento asimismo a toda la organización ya que es una de las áreas principales para conservar y acrecentar la productividad, tomando en cuenta que el mantenimiento incurre en la calidad e importe de la producción.

**a. Objetivo del Mantenimiento:** El mantenimiento industrial de una entidad, tiene el propósito de reducir el tiempo de inactividad imprevisto del equipo para mantener la capacidad de producción con la máxima eficiencia. El trabajo de la máquina ayuda a aumentar la productividad y garantizar la seguridad industrial, mejorar la calidad de productos o servicios realizados, depreciar costos y optimizar recursos.

**b. Ventajas del mantenimiento:** Un buen plan y realización de mantenimiento industrial permiten brindar a las organizaciones las siguientes ventajas, como satisfacción del cliente a razón de la adjudicación del producto en el plazo pactado, disminución de accidentes, debido a buenas condiciones laborales o equipo en buenas condiciones, cuidado a la maquinaria para evitar daños irreparables, adquisición de instrucciones detalladas según las necesidades de la empresa, el presupuesto disminuye con los costos causados por paradas programadas en el proceso de producción. El mantenimiento planificado extiende la vida útil de los productos y reduce la gravedad del problema inevitable.

**c. Procesos de planificación de mantenimiento:** Los procesos de planificación de mantenimiento deben seguir los siguientes pasos: establecer metas, establecer los recursos necesarios, determinar el período de tiempo de trabajo. mantenimiento, formular medidas de mantenimiento, permitir su uso capital, hacer planes adecuados para mantener registros. Se utilizan todas las letras mayúsculas.

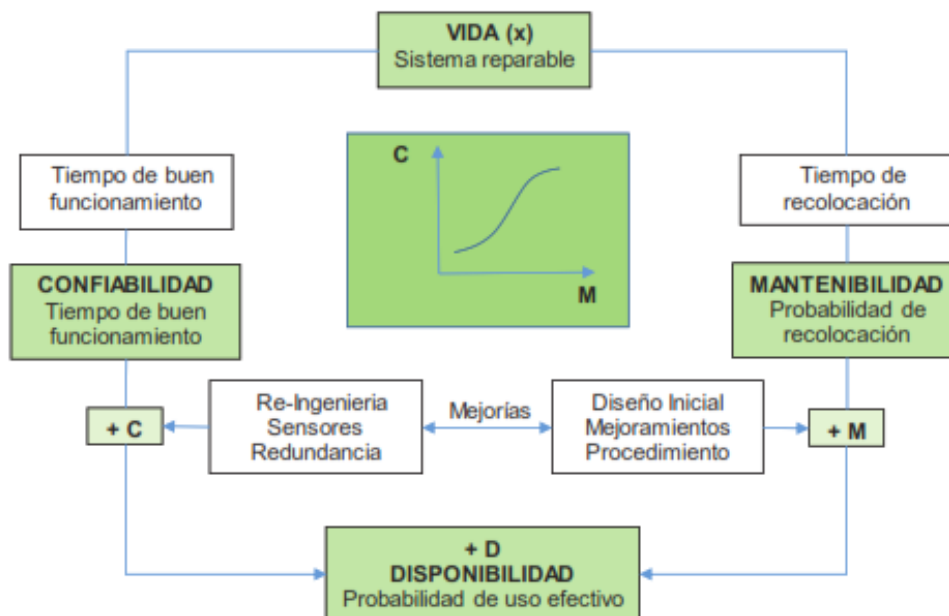
**Figura 10. Planificación del mantenimiento**



Fuente: Gómez L. (2007)

**d. Factores del mantenimiento:** Los diferentes factores del mantenimiento más primordiales que se implican en la práctica de los sistemas de la empresa y sus interrelaciones, se pueden contemplar en la Figura 11 mostrada a continuación:

**Figura 11. Factores de mantenimiento**



Fuente: Espinoza (2014)

**Confiabilidad:** La confiabilidad usualmente se refiere a la certeza que se tiene de que un elemento desarrolle de forma indudable el objetivo asignado, se enuncia el siguiente postulado de confiabilidad con relación al mantenimiento industrial: «La confiabilidad es la probabilidad de que un elemento, dispositivo, equipo o sistema desarrolle una determinada función, en unas condiciones concretas, durante un periodo de prueba determinado».

**Mantenibilidad:** La mantenibilidad se orienta en la comodidad de restauración cuando un elemento llegue a fallar y así nuevamente poner en servicio de manera inmediata, determinando a la mantenibilidad como: «La probabilidad que un dispositivo, equipo, o sistema sea restaurado completamente a su estado operacional dentro de un periodo de tiempo dado, de acuerdo con unos criterios de funcionamientos y procedimientos de reparación preestablecidas».

**Disponibilidad:** El factor disponibilidad hace referencia a la capacidad de un elemento para ser utilizado a sí mismo cuando sea imprescindible, esta sería la meta esencial del mantenimiento industrial, es por ello que se define a la disponibilidad como: «La probabilidad de estar en uso un dispositivo, equipo o sistema en un instante de tiempo dado».

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Hrs.totales funcionamiento} - \text{Hrs.parada por mto.}}{\text{Horas totales de funcionamiento}}$$

Para proceder a formular la disponibilidad de averías, previamente se debe aprender los siguientes indicadores.

**Tiempo medio entre fallas:** Conocido también por sus siglas en ingles MTBF (Mid Time Between Failure), permite conocer la frecuencia con la que suceden las averías.

$$\text{TMEF} = \frac{\text{Horas totales del periodo analizado}}{\text{Cantidad de averías}}$$

**Tiempo medio para reparar:** Conocido por sus siglas en inglés MTTR (Mid Time To Repair), permite conocer la importancia de las averías que se producen en un equipo considerando el tiempo medio hasta su solución.

$$TMPR = \frac{\text{Cantidad de horas de paro por averías}}{\text{Cantidad de averías}}$$

**Disponibilidad por averías:** Se tiene en cuenta solo las paradas por averías y las intervenciones no programadas. Relacionando el tiempo medio entre fallas y el tiempo medio para reparar se obtiene la disponibilidad por averías.

$$\text{Disponibilidad por avería} = \frac{TMEF - TMPR}{TMEF}$$

**e. Tipos de Mantenimiento:** Existen múltiples tipos de mantenimiento, los mencionados a continuación son los más aceptados, importantes y de mayor frecuencia.

**Mantenimiento Correctivo:** Gómez (2007) hace referencia que este tipo de mantenimiento:

No pide una planificación de forma sistemática y se pone en marcha en el momento en que los equipos presentan una falla, es decir el mantenimiento se realiza con la reparación de la maquinaria o equipo ocasionando un paro en el proceso de fabricación o desarrollo y así se produce la disminución de la producción, por lo que su atención corresponde a equipos o maquinaria que se encuentra con bajo nivel de criticidad, es decir que no estén directamente ligados con la producción.

**Mantenimiento Preventivo:** Para Gómez (2007):

Este tipo de mantenimiento procura disminuir la cantidad de intervenciones correctivas a través del empleo de un sistema en el cual se elabore rutinas de inspección y la sustitución de elementos que se encuentran en mal estado, convirtiéndose así en

un mantenimiento planificado a través del tiempo a diferencia del mantenimiento anterior, pues busca no perjudicar de forma directa en la calidad y productividad del producto y/o servicio.

**Mantenimiento Predictivo:** Gómez (2007) propone para este tipo de mantenimiento que:

Es conocido también como «Mantenimiento Basado en Condición», de la misma manera que el mantenimiento preventivo busca aventajar a la avería, esta táctica de mantenimiento intenta obtener el conocimiento del estado del maquina o equipo a través del monitoreo de parámetros de los diferentes sistemas, es por ello que se considera la posibilidad de sustituir los elementos o repuestos cuando ha concluido con su vida útil, y así descartando los paros imprevistos por intervención innecesaria así como también prever los fallos no esperados, a través de técnicas de detección o herramientas de los elementos medibles de antelación a los fallos elaborando un mantenimiento justo en el tiempo preciso (JIT).

**Mantenimiento Productivo Total (TPM):** Gomes (2007), al referirse a este tipo, dice que:

Este tipo de mantenimiento determinado por las siglas en inglés TPM (Total Productivity Maintenance) está fundamentado en la noción japonesa que intenta comprender un panorama más amplio que compile todos las categorías y niveles de la producción con una configuración de planificación de forma jerárquica donde el propio trabajador ejecute una pequeña parte del mantenimiento como ajuste, inspección, reemplazo, etc.

Obteniendo la participación de todos los trabajadores con un mejoramiento continuo de la productividad, y así reforzando para incrementar la competitividad de la organización, situándose a lograr cero pérdidas, cero accidentes, cero defectos.

**Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM):** Según Gomes (2007), este tipo de mantenimiento:

Está centrado en la confiabilidad o RCM hace referencia a técnica para preparación de un plan de mantenimiento en una planta industrial, surge de la necesidad de suprimir accidentes en el plano aéreo, por lo que fue concebido por la industria de la Aviación Civil de Norteamérica por los años 60s, y tiene como finalidad principalmente incrementar la disponibilidad y disminuir costes de mantenimiento.

Esta doctrina del mantenimiento se basa en la localización de fallas, tanto las que ya han ocurrido como las que se están tratando de evitar por medio de hechos preventivos y finalmente las que tienen indiscutible probabilidad de ocurrir y causar problemas graves.

### **2.2.3. Análisis funcionales de fallas:**

A decir de Espinoza (2014), este tipo de análisis:

Es un postulado en el cual se puede emplear a la hora de inventar nuevos procesos y productos. La finalidad principal es examinar las posibles fallas futuras de un producto para luego clasificarlos según su calidad, además el análisis AMFE pretende conseguir todas las fallas posibles controlados.

**Metodología del AMEF:** Los pasos a continuar en un análisis AMFE son:

1. Especificar todos los eventuales tipos de fallas.
2. Insertar el índice de prioridad. Por cada modo de falla se establece tres valores según sea su importancia:

G: Nivel de severidad (gravedad del fallo percibida por el usuario).

F: Nivel de incidencia (probabilidad de que ocurra el fallo).

D: Nivel de detección (probabilidad de que NO detectemos el error antes de que el producto se use).

Al tipo de fallo analizado se asigna un valor de G, F y D entre 1 y 10. Una vez estimado, se multiplicará para obtener el IPR (Índice de Prioridad de Riesgo), que entregará un valor entre 1 y 1000.

$$\text{IPR} = G * F * D$$

En conclusión, se muestra el grado del modo de falla que se está examinando.

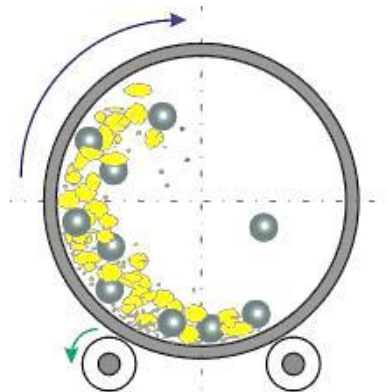
3. Hacer que predominen los modos de falla y encontrar soluciones.

Al momento de conseguir el IPR para todos los modos de falla examinados, se organizarán de manera descendente. Los tipos de falla con alto IPR serán a los que se deberá tomar mayor atención.

#### **2.2.4. Molino de bolas**

Los molinos de bolas poseen un manto cónico o cilíndrico que gira sobre su propio eje horizontal, en el cual se cargan con bolas de porcelana, acero o pedernal, con la finalidad de realizar la molienda del mineral. La alimentación de los molinos de bolas debe ser de 2,4 a 4 cm (1 a 1½ in) para materiales muy frágiles, pero por lo general el tamaño máximo es de 1,3 cm (1/2 in), valores que han sido obtenidos por medio de ensayos experimentales. La mayor parte de los molinos de bolas operan con una razón de reducción de 20:1 a 200:1. (Alcántara Valladares, 2008).

**Figura 12. Corte Transversal de un Molino de bolas.**

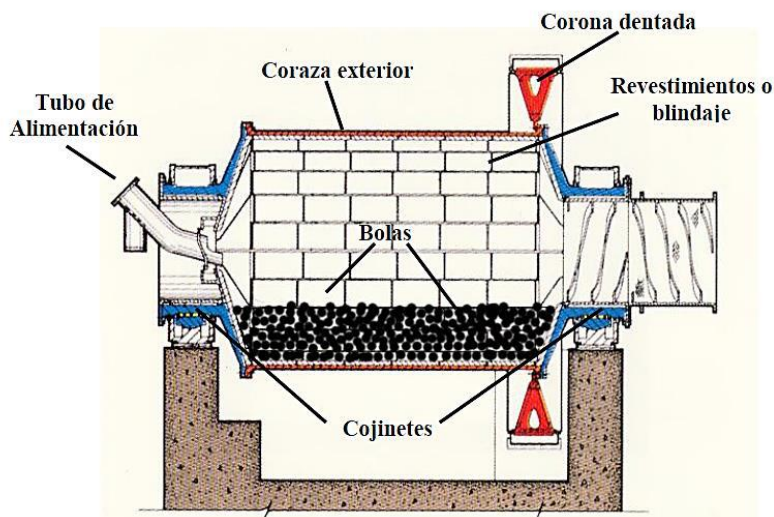


Fuente: Alcántara (2008)



Los molinos de bolas, permiten la molienda, bien sea por vía seca o húmeda, de materias duras, muy duras y abrasivas: piritas, cuarzo y otros minerales duros. Son especialmente indicados para la molienda de materias extremadamente duras (Ángulo García, 2005). Las capacidades de estos molinos de bolas son, por lo general del 28 % al 50 de la capacidad del molino, con medios de molienda de acero y recubrimientos; esto depende directamente de la densidad de los medios (Alcántara, 2008).

**Figura 13. Molino de bolas**



Fuente: (Martínez, 2011)

El proceso de molienda se ejecuta en varias etapas; La primera consiste en fraccionar sólidos de gran tamaño, para lo cual son empleados los trituradores o molinos primarios, aquí los más usados son el de martillos y el de mandíbulas. (Martínez, 2011)

La segunda etapa es la de reducción de tamaño, esta se lleva a cabo con más control, manejándose tamaños intermedios y finos. Para esta etapa el molino más empleado en la industria es el molino de bolas. El molino de bolas lleva a cabo la mayor parte de la reducción por impacto. Cuando este gira sobre su propio eje, provoca que las bolas caigan en cascada desde la altura máxima del molino. Esta acción causa un golpeteo sobre el material a moler;

además de un buen mezclado del material. De esta manera la molienda es uniforme. (Alcántara, 2008).

El molino de bolas es una herramienta vital para rectificar materiales que ya han sido triturados. Es apropiado para la molienda seca o mojada de varios tipos de materiales, en especial los más duros. Actualmente es muy utilizado en muchas industrias como la de cemento, materiales a prueba de fuego, productos de silicato, materiales para la construcción, fertilizantes, vidrio, cerámica, entre otros; también por su bajo consumo de energía. El molino de bolas mantiene una estructura simple comparada con otros molinos, una fácil instalación, largo tiempo de operación con alta capacidad, las partes que se desgastan son resistentes y con larga vida útil, y su producto de molienda mantiene una muy buena calidad (XSM®, 2014).

### **Factores que afectan la eficiencia en la molienda de un molino de bolas**

- Densidad de la pulpa de alimentación; debería ser lo más alta posible, pero garantizando un flujo fácil a través del molino.
- Es esencial que las bolas estén cubiertas de una capa de mena, de tal manera que permanezcan sumergidas en su totalidad en el mineral a molturar.
- El contacto metal-metal disminuye la eficiencia.
- El rango de operación normal de los molinos de bolas es entre 65 % a 80 % de sólidos en peso.
- La carga de bolas y mineral equivalente al 50 % del volumen del molino, resulta la capacidad máxima.
- Las bolas de tamaño mínimo capaces de moler el material alimentado, dan una eficiencia máxima.
- Los ciclos cerrados en los molinos de bolas ofrecen una mejor producción en cuanto a ciclos abiertos, aunque estos últimos permiten un mayor control del proceso y del producto cuando no se requieren producciones considerables o de nivel industrial.

- En el trabajo en seco, la eficiencia y capacidad se mejora con cargas ligeras de minerales. Así mismo, se reduce los requisitos de potencia al disminuir dicha cantidad dentro del molino (Alcántara, 2008).

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Método, tipo y nivel de la investigación

##### 3.1.1. Método de la investigación

**3.1.1.1. Método descriptivo:** (Hernandez-Sampieri, 2010) «El propósito de este método es definir las características, características y perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos u otros fenómenos analizados. En otras palabras, pretende medir o recopilar información solo de forma independiente o junto con los conceptos o variables a los que se refiere, es decir, no tiene la intención de mostrar cómo se relacionan. Describir tendencias en un grupo o población».

**3.1.1.2. Método Analítico:** Echavarría (2010) afirma que «El método analítico es un método de investigación que consiste en descomponer el todo, dividirlo en partes para averiguar las causas, la naturaleza y los efectos. El análisis es la observación y el estudio de un hecho particular».

**3.1.1.3. Método Sintético:** Para Duarte, 2006, «La guía del sistema considera a cada esencia como un sistema o parte del sistema, hallando el sistema como un conjunto de partes, entre las cuales se forma algún tipo de correlación que las articula en una unidad, que es necesariamente el sistema».

### **3.1.2. Tipo de investigación**

El tipo de investigación es correlacional, tiene como finalidad aplicar el conocimiento en casos reales.

### **3.1.3. Nivel de investigación**

El nivel de la investigación es básico. Para Hernández Sampieri (2006) «La utilidad y finalidad principal de los estudios de correlación es conocer cómo se puede comportar un concepto o variable ante el comportamiento de otro u otras variables relacionadas».

### **3.1.4. Diseño de la investigación**

En la investigación se manejará el diseño no experimental transeccional descriptivo, fundado en la teoría de Hernández Sampieri (2006): «Los diseños transversales descriptivos tienen como objetivo examinar la frecuencia y los valores de una o más variables».

La forma consiste en medir las variables planteadas y proporcionar su descripción.

### **3.1.5. Población y muestra de la investigación**

#### **3.1.5.1. Población**

(Hernandez-Sampieri, 2010) «Unión de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones». La población es el número de empresas mineras que cuentan con molino de bolas en la Región.

#### **3.1.5.2. Muestra**

(Hernandez-Sampieri, 2010) «Subgrupo de la urbe del cual se recogen los datos y debe ser característico de ésta». La muestra es la Compañía Minera de Santa Luisa que cuenta con molinos de bolas.

### **3.1.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

#### **3.1.6.1. Técnicas**

La técnica de recopilación de datos utilizada está documentada, se recopiló datos de informes de operación de fábrica, inventario de fábrica, equipos y trabajos de investigación de

la planta de beneficio. «Son medios por los cuales el investigador procede a recoger información requerida de una realidad o fenómeno en función a los objetivos de estudio» (Sánchez Carlessi, 2009, p. 44).

### **3.1.6.2. Instrumentos**

Para la variable independiente y dependiente, se utilizó como instrumentos registros, reportes de operación del molino de bolas, fichas estadísticas, etc.

La recopilación de datos nos proporcionó información y se utilizó para la investigación de parámetros, así como constituir una fuente de información que nos permita analizar e inferir si estos están en la disponibilidad del molino de bolas. Estos trámites se realizaron a través del trabajo de campo. Se utilizó herramientas de investigación y programas, realizando estadísticas cuando fue necesario. Bajo estas circunstancias se hizo un seguimiento del informe de operación del molino de bolas, rastreando los siguientes datos: acción del instrumento técnico, informe de operación de archivos del molino de bolas. Se recopiló datos útiles, así como el registro de informes de inventario para recopilar información necesaria para la encuesta. Además, para el procesamiento y análisis de datos se utilizó el software SPSS.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

##### 4.1.1. Historial de disponibilidad mecánica

En la compañía minera Santa Luisa se maneja un historial mensual de la disponibilidad mecánica, para este trabajo de investigación se tomó la data desde enero del 2018 hasta julio del 2020, donde se puede verificar que tiene un 81 % de promedio de disponibilidad mecánica.

**Figura 14. Disponibilidad mensual**

2018		2019		2020	
MES	DISP. MECANICA	MES	DISP. MECANICA	MES	DISP. MECANICA
ENERO	81%	ENERO	79%	ENERO	83%
FEBRERO	78%	FEBRERO	80%	FEBRERO	82%
MARZO	79%	MARZO	81%	MARZO	84%
ABRIL	81%	ABRIL	78%	ABRIL	79%
MAYO	79%	MAYO	82%	MAYO	81%
JUNIO	77%	JUNIO	82%	JUNIO	81%
JULIO	81%	JULIO	81%	JULIO	82%
AGOSTO	82%	AGOSTO	79%	AGOSTO	
SETIEMBRE	78%	SETIEMBRE	85%	SETIEMBRE	
OCTUBRE	82%	OCTUBRE	80%	OCTUBRE	
NOVIEMBRE	82%	NOVIEMBRE	85%	NOVIEMBRE	
DICIEMBRE	79%	DICIEMBRE	83%	DICIEMBRE	

#### 4.1.2. *Proceso analítico jerárquico*

Para desdoblar la selección de la metodología de gestión de mantenimiento se utilizó el método de Proceso Analítico Jerárquico, conocido en inglés como Analytic Hierarchy Process (AHP) para tomar una decisión más adecuada e identificar la alternativa más conveniente para dar solución al problema de paradas en los molinos de bolas, se presentaron dilemas para el balance de metodologías de mantenimiento de acuerdo con lo descrito en el marco.

Posteriormente, para realizar la evaluación de los métodos, se utilizó la Escala de Thomas Saaty (Universidad de Pittsburg - USA) para decidir qué principio tiene mayor jerarquía en comparación con los otros. La escala de los valores impares representa la realización de una matriz de criterios.

Las escalas 2, 4, 6 y 8 se emplean cuando no se puede precisar con claridad los métodos, ya que son valores intermedios de predilección en la escala.

**Tabla 04. Escala de Thomas Saaty**

<b>Importancia</b>	<b>Definición</b>
1. Igual importancia	Dos acciones contribuyen igualmente al objetivo
2. Valor intermedio-débil	Intermedios entre los valores 1 y 3
3. Valor intermedio-débil	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra
4. Valor intermedio: más moderado	Intermedio entre los valores 3 y 5
5. Fuerte importancia	La práctica y el juicio ayudan fuertemente una actividad sobre otra
6. Valor intermedio-fuerte más	Intermedio entre los valores 5 y 7
7. Muy fuerte o demostrado	Una acción es mejorada fuertemente sobre otra; su superioridad confirmada en la práctica.
8. Valor intermedio-muy fuerte	Intermedio entre los valores 7 y 9
9. Importancia extrema	La certeza que beneficia una actividad sobre otra es de la disposición de aseveración más alta posible.

Fuente: Adaptado de Goodman y Makarand (2015)



La Tabla 4 muestra la escala de Thomas Saaty, utilizada para definir la importancia de criterios. Asimismo, se procedió a hacer los siguientes pasos para la evaluación de la metodología de Proceso Analítico Jerárquico, los cuales son los siguientes:

- El problema se descompone en criterios
- Aprobación de la matriz de criterios
- Normalización de la matriz de razonamientos
- Cotejo de alternativas y decisión de la excelente alternativa
- Estimación de consistencia de la matriz

#### 4.1.2.1. Descomposición del problema

Escogemos los principios que ocasionan el problema de las paradas de los molinos de bolas. La evaluación de criterios se realiza en base a la problemática y las causas del problema que la originan, se evaluaron 10 criterios a evaluarse en la metodología (AHP).

**Tabla 05. Definición de los criterios evaluar**

<b>Criterios</b>	<b>Evaluación de Criterios</b>
<b>C1</b>	Recalentamiento de casquillos (por falta de aceite)
<b>C2</b>	Desprendimiento de forros metálicos
<b>C3</b>	Desgaste piñón de ataque
<b>C4</b>	Desgaste de catalina
<b>C5</b>	Desgaste de <i>spout feeder</i>
<b>C6</b>	Desalineamiento del eje del molino
<b>C7</b>	Contaminación de aceite
<b>C8</b>	Perforación de mallas del <i>trommel</i>
<b>C9</b>	Vibración excesiva en eje (rodamiento en mal estado)
<b>C10</b>	Perforación de trunion

**4.1.2.2. Ponderación de la matriz de criterios**

La ponderación de la matriz de criterios consiste en evaluar los criterios con el objeto de definir cuál de estos tiene mayor importancia según la escala de Thomas Saaty. Cabe señalar que cuando se evalúan los mismos criterios, tienen el mismo significado, por lo que su peso es 1 (uno).

**4.1.2.3. Normalización de la matriz de criterios**

Para normalizar la matriz de criterios, se suman los valores de los principios y cada principio se divide por el total para obtener una matriz normalizada y determinar qué criterios tienen un % mayor en comparación con los otros.

**Tabla 06. Matriz de ponderación de criterios**

Paso 1a: PONDERACIÓN	EVALUACIÓN DE CRITERIOS	Recalentamiento de casquillos (por falta de aceite)	Desprendimiento de forros metálicos	Desgaste piñón de ataque	Desgaste de catalina	Desgaste de spout feeder	Desalineamiento del eje del molino	Contaminación de aceite	Perforación de mallas del tromel	Vibración excesiva en eje (rodamiento en mal estado)	Perforación de trunion
	CRITERIOS	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Recalentamiento de casquillos (por falta de aceite)	C1	1	0.20	2.00	0.33	1.00	0.20	2.00	1.00	3.00	3.00
Desprendimiento de forros metálicos	C2	5.00	1	3.00	5.00	3.00	0.50	7.00	4.00	5.00	3.00
Desgaste piñón de ataque	C3	0.50	0.33	1	0.33	3.00	3.00	3.00	1.00	0.50	0.33
Desgaste de catalina	C4	3.00	0.20	3.00	1	3.00	0.33	4.00	3.00	3.00	2.00
Desgaste de spout feeder	C5	1.00	0.33	0.33	0.33	1	0.50	3.00	3.00	3.00	3.00
Desalineamiento del eje del molino	C6	5.00	2.00	0.33	3.00	2.00	1	2.00	3.00	3.00	3.00
Contaminación de aceite	C7	0.50	0.14	0.33	0.25	0.33	0.50	1	1.00	1.00	1.00
Perforación de mallas del tromel	C8	1.00	0.25	1.00	0.33	0.33	0.33	1.00	1	1.00	1.00
Vibración excesiva en eje (rodamiento en mal estado)	C9	0.33	0.20	2.00	0.33	0.33	0.33	1.00	1.00	1	0.33
Perforación de trunion	C10	0.33	0.33	3.00	0.50	0.33	0.33	1.00	1.00	3.00	1
<b>TOTAL</b>		<b>17.67</b>	<b>4.99</b>	<b>16.00</b>	<b>11.42</b>	<b>14.33</b>	<b>7.03</b>	<b>25.00</b>	<b>19.00</b>	<b>23.50</b>	<b>17.67</b>

**Tabla 07. Normalización de la matriz de criterios (evaluación de fallas)**





### Criterio 6: Desalineamiento del eje del molino

Tabla 10. Comparación de alternativas – Criterio C6

C6	Desalineamiento del eje del molino					
ALTERNATIVAS	TPM	RCM	ECM	Lean Maintenance	Capacitación	Nuevos equipos
TPM	1	1	1	2	2	3
RCM	1	1	2	3	2	3
ECM	1	0.5	1	1	3	3
Lean Maintenance	0.5	0.3	1	1	3	3
Capacitación	0.5	0.5	0.3	0.3	1	2
Nuevos equipos	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	1
<b>TOTAL</b>	<b>4.3</b>	<b>3.7</b>	<b>5.7</b>	<b>7.7</b>	<b>11.5</b>	<b>15.0</b>

Tabla 11. Matriz Normalizada – Criterio C6

MATRIZ NORMALIZADA						VECTOR PROMEDIO
0.231	0.273	0.176	0.261	0.174	0.200	<b>0.219</b>
0.231	0.273	0.353	0.391	0.174	0.200	<b>0.270</b>
0.231	0.136	0.176	0.130	0.261	0.200	<b>0.189</b>
0.115	0.091	0.176	0.130	0.261	0.200	<b>0.162</b>
0.115	0.136	0.059	0.043	0.087	0.133	<b>0.096</b>
0.077	0.091	0.059	0.043	0.043	0.067	<b>0.063</b>
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

**4.1.2.5. Comparación y decisión de la mejor alternativa:** La mejor alternativa será la que englobe el mayor % de ponderación en todos los criterios. Asimismo, en la Tabla 12 se puede contemplar que la metodología RCM tiene un mayor % de ponderación para el problema de las paradas de transporte de LGN, por lo que es la más adecuada, siguiendo los pasos de la metodología de Proceso Analítico Jerárquico de Thomas Saaty.

**Tabla 12. Selección de alternativas Modelo Proceso Analítico Jerárquico**

Evaluación de alternativas para la evaluación de criterios			
Alternativas	C2	C6	PONDERACIÓN (%)
TPM	0.200	0.219	8%
RCM	0.239	0.270	10%
ECM	0.142	0.189	7%
Lean Maintenance	0.178	0.162	7%
Capacitación	0.159	0.096	5%
Nuevos equipos	0.082	0.063	3%
Peso del criterio	0.226	0.178	

#### 4.1.2.6. Evaluación de consistencia

Se realizó el estudio de consistencia con la finalidad de que no exista tendencia para alguna alternativa en la metodología. De acuerdo a lo que precisa la metodología AHP, si el nivel de flexibilidad es menor a 10 % = 0.1, el nivel de flexibilidad de la matriz es aceptable.

Evaluación de Consistencia del Criterio - C2:

**Tabla 13. Evaluación de consistencia – Criterio 2**

C2	Desprendimiento de forros metalicos						VECTOR PROMEDIO	VECTOR
	ALTERNATIVAS	TPM	RCM	ECM	Lean Maintenance	Capacitación		
TPM	1	1	2	1	1	2	0.200	1.2243
RCM	1	1	2	1	2	3	0.239	1.4653
ECM	0.5	0.5	1	1	1	2	0.142	0.8627
Lean Maintenance	1	1	1	1	1	2	0.178	1.0825
Capacitación	1	0.5	1	1	1	2	0.159	0.9627
Nuevos equipos	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	1	0.082	0.5013
TOTAL	5.0	4.3	7.5	5.5	6.5	12.0		6.0988

Aplicando las fórmulas de Consistencia:

$$i) \quad \text{Índice de Consistencia (IC)} = (\lambda \text{ max} - n) / (n - 1)$$

$$IC = (6.0988 - 6) / (6 - 1) = 0.052$$

$$ii) \quad \text{Índice Aleatorio (IA)} = \frac{1.98(n-2)}{n}$$

$$\text{Índice Aleatorio (IA)} = \frac{1.98(6 - 2)}{6} = 1.32$$

$$iii) \quad \text{Relación de Consistencia} = \frac{IC}{IA}$$

$$\text{Relación de Consistencia (RC)} = \frac{0.052}{1.32} = 0.014968$$

La correlación de consistencia (RC) es  $0.014968 < 0.1$ , por lo tanto, el nivel de inconsistencia de la matriz es aceptable.

Evaluación de Consistencia del Criterio – C6:



Tabla 14. Evaluación de consistencia – Criterio 6

C6	Desalineamiento del eje del molino						VECTOR PROMEDIO	VECTOR
	ALTERNATIVAS	TPM	RCM	ECM	Lean Maintenance	Capacitación		
TPM	1	1	1	2	2	3	0.219	1.3848
RCM	1	1	2	3	2	3	0.270	1.7363
ECM	1	0.5	1	1	3	3	0.189	1.1831
Lean Maintenance	0.5	0.3	1	1	3	3	0.162	1.0285
Capacitación	0.5	0.5	0.3	0.3	1	2	0.096	0.5843
Nuevos equipos	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	1	0.063	0.3915
<b>TOTAL</b>	<b>4.3</b>	<b>3.7</b>	<b>5.7</b>	<b>7.7</b>	<b>11.5</b>	<b>15.0</b>		<b>6.3086</b>

Aplicando las fórmulas de Consistencia:

$$i) \quad \text{Índice de Consistencia (IC)} = (\lambda \max - n) / (n - 1)$$

$$IC = (6.3086 - 6) / (6 - 1) = 0.061714$$

$$ii) \quad \text{Índice Aleatorio (IA)} = \frac{1.98(n-2)}{n}$$

$$\text{Índice Aleatorio (IA)} = \frac{1.98(6-2)}{6} = 1.32$$

$$iii) \quad \text{Relación de Consistencia} = \frac{IC}{IA}$$

$$\text{Relación de Consistencia (RC)} = \frac{0.061714}{1.32} = 0.046753$$

La relación de consistencia (RC) es  $0.046753 < 0.1$ , por lo tanto, el nivel de inconsistencia de la matriz es aceptable.

#### **4.1.3. Aplicación de la metodología RCM**

Teniendo en cuenta que se tiene como disponibilidad mecánica un 81 %, y que la metodología RCM es la indicada para incrementarla, se procedió a ejecutar durante un año para esta investigación, periodo que inició en agosto del 2020 hasta julio del 2021.

Para desarrollar la metodología RCM tuvo lugar a través de 10 fases:

**FASE 1:** *Definición de indicadores clave:* El indicador que se ha seleccionado es la disponibilidad, el cual será estudiado a lo largo de las siguientes fases.

**FASE 2:** *Listado y codificación de equipos:* La Minera Santa Luisa cuenta con tres molinos de bolas con las siguientes medidas: 9x11 (1), 8x11 (1) y 8x3 (2) y 9<sup>1</sup>/<sub>2</sub>x14 (1) diámetro x largo en pies, a los cuales se les mide la disponibilidad mecánica semanalmente; sin embargo, para esta investigación se tomó el promedio de estas semanas para obtener un promedio de disponibilidad mecánica mensual, con el cual se trabajó (Figura 14).

**FASE 3:** *Listado de funciones y especificaciones:* El propósito principal de un molino de bolas es reducir su tamaño a un tamaño adecuado para que pueda sufrir un proceso de compactación (flotación, gravimétrica o magnética) y/o lixiviación (cianuración de minerales auríferos). La molienda es un proceso que suele implicar la adición de agua y reactivos químicos como la cal para ajustar el pH, agentes reductores como el sulfato de zinc y el cianuro, y algunos reactivos con propiedades especiales según el mineral utilizado (como la adición de colectores de molibdenita).

**Figura 15. Clasificación taxonómica**

**FASE 4:** *Determinación de fallos principales y secundarios:* En los tres molinos de bolas se identificaron diez fallas de las cuales en la Tabla N.º 7 se estableció la jerarquía de fallas mediante la matriz AHP.

**Tabla 15. Fallas principales y secundarias**

CRITERIOS		% DE CRITICIDAD
<b>C2</b>	Desprendimiento de forros metálicos	23 %
<b>C6</b>	Desalineamiento del eje del molino	18 %
<b>C4</b>	Desgaste de catalina	13 %
<b>C3</b>	Desgaste de piñón de ataque	10 %
<b>C5</b>	Desgaste de <i>spout feeder</i>	9 %
<b>C1</b>	Recalentamiento de casquillos (por falta de aceite)	8 %
<b>C10</b>	Perforación de trunion	7 %
<b>C8</b>	Perforación de mallas del trommel	5 %
<b>C7</b>	Contaminación de aceite	4 %
<b>C9</b>	Vibración excesiva en eje (rodamiento en mal estado)	4 %

**FASE 5: Determinación de modos de fallo:** De las 10 fallas reconocidas se determinaron las posibles causas de cada una, basados en el historial de fallas.

**Tabla 16. Modos de fallos**

CRITERIOS		CAUSAS
<b>C1</b>	Recalentamiento de casquillos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de aceite</li> <li>- Alineamiento incorrecto del eje</li> </ul>
<b>C2</b>	Desprendimiento de forros metálicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desgaste de forros</li> <li>- Incorrecto ensamblaje de forros</li> <li>- Variación de granulometría del mineral</li> <li>- Falta de ajuste de pernos</li> </ul>
<b>C3</b>	Desgaste de piñón de taque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso</li> <li>- Alineamiento incorrecto del piñón</li> </ul>
<b>C4</b>	Desgaste de catalina	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso</li> <li>- Alineamiento incorrecto del piñón</li> </ul>
<b>C5</b>	Desgaste de <i>spout feeder</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso</li> <li>- Encauchado deficiente</li> </ul>
<b>C6</b>	Desalineamiento del eje del molino	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibración excesiva</li> <li>- Sobrecarga de material</li> <li>- Falta de ajuste en chumaceras</li> <li>- Desgaste de rodamientos</li> </ul>
<b>C7</b>	Contaminación de aceite	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mala práctica en adición de mineral</li> <li>- Desgaste de componentes</li> <li>- Degradación del aceite</li> </ul>
<b>C8</b>	Perforación de mallas del trommel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exceso de carga</li> <li>- Cambio de mineral (zinc, plomo, cobre)</li> </ul>
<b>C9</b>	Vibración excesiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rodamiento en mal estado</li> <li>- Falta de alineamiento de eje</li> <li>- Falta de ajuste de pernos</li> <li>- Uso</li> </ul>
<b>C10</b>	Perforación de trunion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso</li> <li>- Material deficiente</li> </ul>

Fuente: Historial de fallas de Minera Santa Luisa

**FASE 6: Estudio de criticidad de fallos:** Teniendo en cuenta que en la fase 5 ya se identificaron las causas de las fallas (Tabla 16), se procedió a evaluar y luego clasificar los fallos según su gravedad: crítico, significativo, tolerable e insignificante.

**Tabla 17. Análisis de criticidad**

CRITICIDAD		CAUSAS	CRITICIDAD
C1	Recalentamiento de casquillos	Falta de aceite	CRÍTICO
		Alineamiento incorrecto del eje	SIGNIFICATIVO
C2	Desprendimiento de forros metálicos	Desgaste de forros	CRÍTICO
		Incorrecto ensamblaje de forros	CRÍTICO
		Variación de granulometría del mineral	SIGNIFICATIVO
		Falta de ajuste de pernos	SIGNIFICATIVO
C3	Desgaste de piñón de taque	Uso	INSIGNIFICANTE
		Alineamiento incorrecto del piñón	SIGNIFICATIVO
C4	Desgaste de catalina	Uso	INSIGNIFICANTE
		Alineamiento incorrecto del piñón	SIGNIFICATIVO
C5	Desgaste de <i>spout feeder</i>	Uso	INSIGNIFICANTE
		Encauchado deficiente	SIGNIFICATIVO
C6	Desalineamiento del eje del molino	Vibración excesiva	CRÍTICO
		Sobrecarga de material	TOLERABLE
		Falta de ajuste en chumaceras	SIGNIFICATIVO
		Desgaste de rodamientos	SIGNIFICATIVO
C7	Contaminación de aceite	Mala práctica en adición de mineral	SIGNIFICATIVO
		Desgaste de componentes	TOLERABLE
		Degradación del aceite	CRÍTICO
C8	Perforación de mallas del trommel	Exceso de carga	SIGNIFICATIVO
		Cambio de mineral (Zinc, Plomo, Cobre)	TOLERABLE
C9	Vibración excesiva	Desgaste de rodamientos	SIGNIFICATIVO
		Falta de alineamiento de eje	SIGNIFICATIVO
		Falta de ajuste de pernos	SIGNIFICATIVO
		Uso	INSIGNIFICANTE

C10	Perforación de trunion	Uso	INSIGNIFICANTE
		Material deficiente	TOLERABLE

**FASE 7: Determinación de las medidas preventivas:** Habiendo identificado la criticidad (véase Tabla 17) se procedió a definir las medidas correctivas para su aplicación.

**Tabla 18. Medidas preventivas**

CRITICIDAD	MEDIDAS PREVENTIVAS
CRÍTICO	Inspección visual, <i>checklist</i> , plan de mantenimiento, ficha de mantenimiento
SIGNIFICATIVO	Inspección visual, <i>checklist</i> , plan de mantenimiento
TOLERABLE	Inspección visual, <i>checklist</i>
INSIGNIFICANTE	Inspección visual

**FASE 8: Agrupación de medidas preventivas:** En la fase 7 se determinó las medidas preventivas (Tabla 18), las cuales se agrupan en 4: inspecciones visuales, *checklist*, plan de mantenimiento y ficha de mantenimiento, las mismas que se llevaron a cabo en la siguiente fase.

**FASE 9: Implementación de Resultados:** Se realiza la puesta en marcha. A continuación, se mostrará cómo se han ido implementando las medidas preventivas:

**Tabla 19. Ficha de Mantenimiento - Molinos**



**FICHA DE  
MANTENIMIENTO  
MOLINOS**



FIRMA

Realizado por: David Toledo Raul  
Raul Condero Raul  
Antonio Zegarra Alie  
Elvis Rodriguez Elvis

Fecha: 14/03/21  
Molino 9x11

Tipo de Mantenimiento: Preventivo

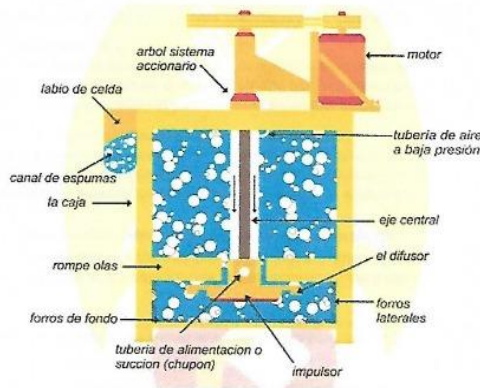
Cambio de forros

Tuberia de aire  Inspección

Eje central  Inspección  Alineamiento

Cambio de rodamientos

Cambio de impulsor



[Signature]  
 Supervisor

Tabla 20. Checklist – Molinos

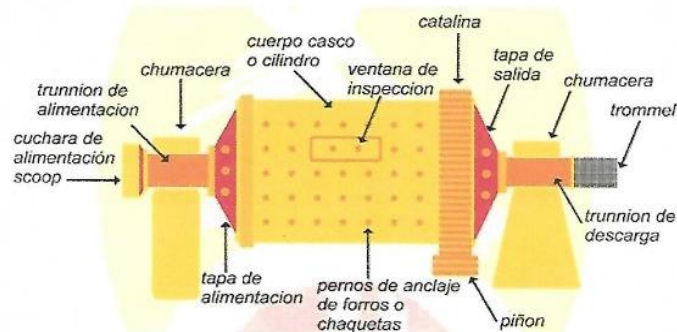


## CHECK LIST - MOLINOS



Realizado por: Antonio Jarama JAL FIRMA Fecha: 11/03/21  
David Toledo DAU  
Elvis Rodriguez ER  
Raul Condezo RC  
 Molino 8x9

Chumaseras	Desgastado	Regular	Mal estado
Trunion de alimentación	Desgastado	Regular	Mal estado
Tapa de alimentación	Desgastado	Regular	Mal estado
Catalina	Desgastado	Regular	Mal estado
Piñon	Desgastado	Regular	Mal estado
Trommel	Desgastado	Regular	Mal estado
Trunion de descarga	Desgastado	Regular	Mal estado
Pernos	Fracturado	Ajustado	Tambaleante



[Signature]  
Supervisor



Tabla 21. Programa de Mantenimiento-marzo 2021

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO MOLINOS - MARZO 2021																																												
OT	REQUERIMIENTO	PERSONAL	TAG	EQUIPO	ACTIVIDAD	CRITICIDAD	HORAS ESTIMADAS	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	CUMPLI MIENTO	
								01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31						
1716354	Aceite 150	J. Chirinos	PM02	MOLINO REMOLIENDA 8X9	Cambio de aceite	CRÍTICO	1h		X				X			X			X			X			X			X			X			X			X			X			90%	
1716356	Forros metalicos	V. Sanchez N. Cuyutupac M. Pablo	PM02	MOLINO REMOLIENDA 8X9	Cambio de forros metalicos	CRÍTICO	18h										X	X																										85%
1716441	Perno 5/8x4	M. Ramirez	PM02	MOLINO REMOLIENDA 8X9	Ajuste de pernos	SIGNIFICATIVO	1h		X				X			X			X			X			X			X			X			X			X			X			80%	
1716442		E. Narciso	PM02	MOLINO REMOLIENDA 8X9	Alinmaineto de piñón	SIGNIFICATIVO	2h										X																											80%
1716552	Caucho	A. Zegarra	PM02	MOLINO REMOLIENDA 8X9	Encauchado de spout feeder	SIGNIFICATIVO	4h										X																										90%	
		D. Toledo	PM02	MOLINO REMOLIENDA 8X9	Alineamiento de eje	CRÍTICO	2h											X																									90%	
		E. Rodriguez	PM02	MOLINO REMOLIENDA 8X9	Ajuste de chumaseras	SIGNIFICATIVO	2h												X																								90%	
	Rodamientos	R. Condezo	PM02	MOLINO REMOLIENDA 8X9	Cambio de rodamientos	SIGNIFICATIVO	4h											X																									90%	
1716667	Aceite 150	J. Chirinos	PM02	MOLINO Nº 1 8X11	Cambio de aceite	CRÍTICO	1h		X				X			X			X			X			X			X			X			X			X			X			100%	
1716721	Forros metalicos	V. Sanchez N. Cuyutupac M. Pablo	PM02	MOLINO Nº 1 8X11	Cambio de forros metalicos	CRÍTICO	20h												X	X																							90%	
1716745	Perno 9/16x4	E. Narciso	PM02	MOLINO Nº 1 8X11	Ajuste de pernos	SIGNIFICATIVO	1h		X				X			X			X			X			X			X			X			X			X			X			90%	
1716768		M. Ramirez	PM02	MOLINO Nº 1 8X11	Alinmaineto de piñón	SIGNIFICATIVO	2h											X																									85%	
1716782	Caucho	A. Zegarra	PM02	MOLINO Nº 1 8X11	Encauchado de spout feeder	SIGNIFICATIVO	4h												X																								90%	
		D. Toledo	PM02	MOLINO Nº 1 8X11	Alineamiento de eje	CRÍTICO	2h													X																							85%	
		E. Rodriguez	PM02	MOLINO Nº 1 8X11	Ajuste de chumaseras	SIGNIFICATIVO	2h													X																							100%	
	Rodamientos	R. Condezo	PM02	MOLINO Nº 1 8X11	Cambio de rodamientos	SIGNIFICATIVO	4h													X																							100%	
1716797	Aceite 150	J. Chirinos	PM02	MOLINO Nº 2 9X11	Cambio de aceite	CRÍTICO	1h		X				X			X			X			X			X			X			X			X			X			X			80%	
1716811	Forros metalicos	V. Sanchez N. Cuyutupac M. Pablo	PM02	MOLINO Nº 2 9X11	Cambio de forros metalicos	CRÍTICO	22h													X	X																						80%	
1716832	Perno 1 1/2x5	E. Narciso	PM02	MOLINO Nº 2 9X11	Ajuste de pernos	SIGNIFICATIVO	1h		X				X			X			X			X			X			X			X			X			X			X			95%	
1716849		M. Ramirez	PM02	MOLINO Nº 2 9X11	Alinmaineto de piñón	SIGNIFICATIVO	2h													X																							85%	
1716865	Caucho	A. Zegarra	PM02	MOLINO Nº 2 9X11	Encauchado de spout feeder	SIGNIFICATIVO	4h													X																							85%	
		D. Toledo	PM02	MOLINO Nº 2 9X11	Alineamiento de eje	CRÍTICO	2h														X																						90%	
		E. Rodriguez	PM02	MOLINO Nº 2 9X11	Ajuste de chumaseras	SIGNIFICATIVO	2h														X																						100%	
	Rodamientos	R. Condezo	PM02	MOLINO Nº 2 9X11	Cambio de rodamientos	SIGNIFICATIVO	4h														X																						100%	
CUMPLIMIENTO DEL PROGRAMA																															90%													

**FASE 10: Mejora continua:** Se repitió este procedimiento tres (3) veces durante un año (tiempo que duró el estudio para este trabajo de investigación), cabe resaltar que la mayor dificultad es el cumplimiento de los programas de mantenimiento; es decir, la adaptación a la cultura de cumplimiento tanto para el personal técnico como para los supervisores, esto debido a la existencia de dos guardias (equipos que trabajan en la modalidad 20 días de trabajo x 10 de descanso).

Se obtuvo los dos primeros meses un aumento de disponibilidad del 6 %, seguidamente los meses de octubre, noviembre y diciembre un incremento de 11 %, llegando a un total de 93 %, para el año 2021. Los meses de enero, febrero y marzo la disponibilidad bajó en un 8 % quedando en 90%. Finalmente, los últimos cuatro meses del estudio, la disponibilidad se mantuvo entre el 92 % y 93 %.

#### **4.2. Prueba de hipótesis**

Existe una diferencia significativa entre la disponibilidad antes de someterse a un plan de mantenimiento (PRE-TEST) y la disponibilidad después de realizar el mantenimiento (POST-TEST).

Redacción de la Hipótesis

- $H_0$ = No Hay diferencia significativa en la disponibilidad antes y después del Mantenimiento.
- $H_1$ = Hay una diferencia significativa en la disponibilidad antes y después del mantenimiento

Para comprobar la hipótesis se realizó dos pruebas, una de normalidad y otra de T para muestras relacionadas:

#### 4.2.1. Prueba de normalidad

Se utilizó la prueba de Chapiro Wilk para muestras pequeñas (<30 datos)

El criterio que se determinó para comprobar la prueba de normalidad:

- P-Valor  $\alpha$  Aceptar  $H_0$ =Los datos provienen de una distribución normal.
- P-Valor  $\alpha$  Aceptar  $H_1$ =Los datos no provienen de una distribución normal

**TABLA 22. Resumen de procesamiento de casos**

DISPONIBILIDAD	VÁLIDO		CASOS PERDIDOS		TOTAL	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Disponibilidad antes	12	100,0 %	0	0,0 %	12	100,0 %
Disponibilidad después	12	100,0 %	0	0,0 %	12	100,0 %

**Tabla 23. Descriptivos**

DESCRIPTIVOS				
			Estadístico	Error Estándar
Disponibilidad Antes	Media		82,00	0,603
	95 % de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	80,67	
		Límite Superior	83,33	
	Media recortada al 5 %		82,00	
	Mediana		82,00	
	Varianza		4,364	
	Desviación estándar		2,089	
	Mínimo		79	
	Máximo		85	
	Rango		6	
	Rango intercuartil		4	
	Asimetría		,000	,637
	Curtosis		-1,054	1,232
Disponibilidad Después	Media		91,25	,566
	95 % de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	90,00	
		Límite Superior	92,50	
	Media recortada al 5 %		91,33	
Mediana		92,00		

	Varianza	3,841	
	Desviación estándar	1,960	
	Mínimo	88	
	Máximo	93	
	Rango	5	
	Rango intercuartil	3	
	Asimetría	-,679	,637
	Curtosis	-1,064	1,232

**Tabla 24. Pruebas de normalidad**

<b>Pruebas de Normalidad</b>						
	Kolmogoroy – Smirnova			Shapiro - Wilk		
	Estadístico	Gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
<b>Disponibilidad antes</b>	0,101	12	0,200	0,941	12	0,511
<b>Disponibilidad después</b>	0,232	12	0,073	0,812	12	0,013

\* Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

Con los datos obtenidos aplicando el SPSS se determina la normalidad y sus conclusiones

**Tabla 25. Normalidad**

<b>NORMALIDAD</b>		
<b>P – VALOR = 0,511</b>	>	$\alpha = 0,05$
<b>P – VALOR = 0,013</b>	<	$\alpha = 0,05$
Conclusiones: Los datos de disponibilidad provienen de un a distribución normal.		

#### **4.2.2. Prueba T para Muestras Relacionadas**

Estadísticas de muestras emparejadas:

**Tabla 26. Prueba T**

PRUEBA «T»				
	Media «N»	Desviación	Error	Promedio
<b>Disponibilidad antes</b>	82,00	12	2,089	0,603
<b>Disponibilidad después</b>	91,25	12	1,960	0,566

Correlaciones de muestras emparejadas:

**Tabla 27. Correlación**

	n.º	Correlación	Sig.
<b>Disponibilidad antes &amp; Disponibilidad después</b>	12	-0,200	0,533

**Figura 16. Prueba de muestras emparejadas**

		Prueba de muestras emparejadas							
		Diferencias emparejadas							
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	Sig. (bilateral)
					Inferior	Superior			
Par 1	Disponibilidad Antes - Disponibilidad despues	-9,250	3,137	,906	-11,243	-7,257	-10,214	11	,000

De acuerdo a los datos obtenidos tras la aplicación del paquete estadístico SPSS, mediante la T de student, se presenta en el siguiente cuadro.

**Tabla 28. Muestras relacionadas**

PRUEBA «T» PARA MUESTRAS RELACIONADAS		
<b>P-VALOR = 0.000</b>	<	A=0.05
<b>CONCLUSIONES:</b> Hay una diferencia significativa en las medias de la disponibilidad antes y después del mantenimiento, por lo que se concluye que el tratamiento (Mantenimiento) sí tiene efecto significativo sobre la disponibilidad: Como se puede observar, de una disponibilidad promedio, antes del mantenimiento, del 81 %, se incrementó a un 91,25 % después del proceso.		

### 4.3. Discusión de resultados

A vista de los hallazgos de este trabajo de investigación, aceptamos la hipótesis que establece: Elaboración del Modelo de Jerarquización del tipo de mantenimiento a seleccionar que nos permitiera incrementar la disponibilidad mecánica del molino de bolas en la compañía Minera Santa Luisa.

Estos resultados muestran relación con lo que sostiene Jaramillo (2016), acerca del modelo de jerarquización de equipos AHP, el cual, en función de su criticidad, aplicado a un sistema tranviario ayuda a determinar la criticidad de los equipos de este.

Entonces, en esta investigación, a partir de la aplicación del método AHP se logró identificar que la metodología RCM es la idónea para este estudio, además a partir de la evaluación de las fallas, se encontró las dos más críticas: desprendimiento de forros metálicos y desalineamiento del molino.

Antes de aplicar el método RCM, la disponibilidad mecánica tenía un promedio de 81 %, después de aplicar dicho método durante 12 meses, se observa que la disponibilidad mecánica tiene un promedio de 91 %.

**Figura 17. Disponibilidad mensual durante el tiempo de estudio**

2020		2021	
MES	DISP. MECANICA	MES	DISP. MECANICA
ENERO		ENERO	90%
FEBRERO		FEBRERO	90%
MARZO		MARZO	90%
ABRIL		ABRIL	93%
MAYO		MAYO	92%
JUNIO		JUNIO	93%
JULIO		JULIO	93%
AGOSTO	88%	AGOSTO	
SETIEMBRE	88%	SETIEMBRE	
OCTUBRE	93%	OCTUBRE	
NOVIEMBRE	93%	NOVIEMBRE	
DICIEMBRE	92%	DICIEMBRE	

## CONCLUSIONES

1. El modelo de jerarquización AHP demostró que es de fácil uso y comprensión, lo cual facilitó el inicio correcto de este trabajo de investigación.
2. El modelo de jerarquización AHP mostró que el RCM es el mejor tipo de mantenimiento para este trabajo de investigación, obteniendo un 10 %, anteponiéndose al TPM (8 %), ECM (7 %), *lean maintenance* (5 %) y capacitaciones (3 %).
3. De las fallas más recurrentes que se hallaron en el historial se eligieron 10 y, mediante la matriz AHP, se pudo identificar las más críticas y las menos críticas, siendo como las dos más importantes: desprendimientos de forros metálicos (23 %) y desalineamiento de molinos (18 %). Todas las fallas fueron consideradas dentro del programa mensual de mantenimiento para su tratamiento adecuado según criticidad.
4. El promedio de la disponibilidad mecánica antes de realizar el trabajo de investigación fue de 81 %, una vez aplicada la metodología RCM, durante un año, el promedio de la disponibilidad mecánica aumentó en un 10.25 %, lo cual llevó a un 91.25 % como resultado final. Cabe aclarar que la metodología RCM busca disminuir el modo de falla, mas no eliminarlo.

### Bibliografía

1. **JARAMILLO, R. y MATAILO, M.** Modelo de jerarquización de equipos en función de su criticidad aplicado a un sistema tranviario. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico Automotriz) Cuenca - Ecuador: Universidad del Azuay, 2016, pp.117  
  
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/5822/1/12142.pdf>
2. **SALAS J., LEYVA M. y CALENZANI A. 2014.** Modelo del proceso jerárquico analítico para optimizar la localización de una planta industrial. *Industrial Data*. Julio - Diciembre 2014. págs. 17(2), pp. 112-119. ISSN: 1810-9993  
  
<https://www.redalyc.org/pdf/816/81640856014.pdf>
3. **BARRIOS, M.** Optimización de los Sistemas de Control de un Molino de Bolas. Tesis (Título de Ingeniero Electrónico) Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín, 2015, pp. 89  
  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3153/IEbasamg.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
4. **CAMPOS, O. y otros.** Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, bases de datos y criticidad de efectos. *Científica*, 2019, 27(1), pp. 51-59  
  
<https://www.redalyc.org/journal/614/61458265006/html/>
5. **CCAHUANA, A.** Estudio Comparativo del Molino SAG 40 ft x 25 ft y el Molino Convencional de Bolas 26 ft x 40 ft en la Compañía Antapaccay. Tesis (Título Profesional de Ingeniero metalurgista). Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín, 2018, pp. 137  
  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/7591>
6. **DUARTE, J.** *Fundamentos de manufactura moderna*. Mexico: McGraw - Hill Interamericana S. A. de C. V., 2006.
7. **ECHEVARRIA, J.** Diseño y Construcción de un Molino de bolas para Aplicaciones de Pulvimetalurgia en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico) Ambato - Ecuador: Universidad Técnica de Ambato, 2010.
8. **ESPINOZA, F.** *Implementación de Análisis Modal de Fallos*. 2014. págs. 3-11.
9. **ÁNGULO, F.** *Diseño y Construcción de un Molino de Bolas de Alta Energía y Alta Capacidad*. Santiago de Cali: s.n., 2005.
10. **GAMBOA, J.** Mantenimiento centrado en la Confiabilidad para el Molino de Bolas Kurimoto 8'x6' en la Unidad Minera Catalina Huanca. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico) Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2017, pp. 133  
  
<https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/10137/Gamboa%20Monta%20lvo%20c%20Julio%20Alberto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>



11. **GARCÍA, G.** *Proceso de Análisi Jerárquico AHP*. 2010.
12. **GÓMEZ, L.** *Factores de Mantenimiento*, Universidad de Madrid, España. 2007. págs. 60-67.
13. **MAQUERA, M.** Optimización del Mantenimiento en el Cambio de los Forros en el Molino Fuller de la Empresa Southern Perú - Toquepala. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Mecánico) Puno: Universidad Naconal del Altiplano, 2017, pp. 121  
  
[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/8471/Maquera\\_Frisancho\\_Marco\\_Antonio.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/8471/Maquera_Frisancho_Marco_Antonio.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
14. **MARINARO, J.** Tarifa de energía eléctrica para la ciudad de la Paz. Tesis (Título de Licenciado en Economía) La Paz: Universidad Mayor de San Andrés, 1988, pp. 230  
  
<https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/3439/T-83.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
15. **MARINEZ, P.** Diseño, construcción y determinación de los parámetros de operacion de un molino de bolas para el laboratorio metalúrgico de la Escuela Profesional de Ingeniería Química. Arequipa, Perú : s.n., 2011.
16. **MUÑOZ, J.** Propuestas de Mejora para el Proceso de Cambio de Revestimiento para el Molino de Bolas en el Área de Concentradora en una Empresa Minera, Arequipa 2018. Tesis (Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Industrial) Arequipa: Universidad Continental, 2019, pp. 87  
  
[https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/5525/2/IV\\_FIN\\_108\\_TI\\_Munoz\\_Ramirez\\_2019.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/5525/2/IV_FIN_108_TI_Munoz_Ramirez_2019.pdf)
17. **NARVAEZ, J.** Análisis de Fallas del Molino de Bolas 20x30 para Propuesta de Plan de Mantenimiento Preventivo en Planta Concentradora del Brocal. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Mecánico) Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2020, pp. 119  
  
[https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6855/To10\\_45476152\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6855/To10_45476152_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
18. **SEPULVEDA, R.** “Subsidios cruzados en el pago del valor agregado de distribución en el área típica N°1”. Tesis (Título de Ingeniero Civil Electricista) Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2006, pp. 111  
  
[https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102844/sepulveda\\_r3.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102844/sepulveda_r3.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
19. **HERNANDEZ-SAMPIERI R., FERNÁNDEZ C. y BAPTISTA P.** *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill Interamerica Editores, S. A. de C. V., 2006.
20. **HERNANDEZ-SAMPIERI R., FERNÁNDEZ C. y BAPTISTA P.** *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill Interamerica Editores, S. A. de C. V., 2010. 978-607-15-0291-9.

21. **ZAMORA, I.** "Diseño de un plan de Mantenimiento para un Molino de Bolas de la Empresa Compañía Minera Cerro Negro S.A." Tesis (Título de Ingeniero Civil Mecánico) Quipué - Chile: Universidad Pontificia Católica de Valparaíso, 2018, 298.  
[http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/Txt-9500/UCC9690\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/Txt-9500/UCC9690_01.pdf)
22. **SÁNCHEZ, H. 2009.** *Diseño y construcción de un molino para la extracción.* Quito, Ecuador: s.n., 2009. pág. 44.
23. **QUINTANA, N.** Estudio de puesta en marcha para Molino de Bolas y Planta de Flotación en Minería Cerro Negro. Tesis (Título de Ingeniero Civil en Metalurgia Extractiva) Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2015, 136  
[http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/Txt-0000/UCD0007\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/Txt-0000/UCD0007_01.pdf)
24. **SAATY, T.** *The Analytical Hierararchical.* 2008. pág. 15.
25. **TOSKANO, G.** El Proceso de Analisis Jerarquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Seleccin de Proveedores. Tesis (Título Profesional de Licenciado en Investigación Operativa) Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2005, pp. 100.  
[https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano\\_hg/toskano\\_hg.pdf](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano_hg/toskano_hg.pdf)
26. **ALCÁNTARA, J.** Diseño Práctico de un Molino de Bolas. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico) México D. F.: Instituto Politecnico Nacional, 2008, pp. 123  
<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/107/1/TESIS%20Juan%20Ramon%20Alcantara%20Valladares%20%20MOLINO%20DE%20BOLAS.pdf>

# **ANEXOS**



**ANEXO 2. MATRIZ DE CONSISTENCIA**

<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>HIPÓTESIS</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>POBLACIÓN Y MUESTRA</b>
La Compañía Minera Santa Luisa está ubicada en el departamento Ancash de la provincia de Bolognesi, distrito de Huallanca, los minerales que explota incluyen plomo, cobre y zinc. La unidad de la mina Huallanca ha estado en operación continua durante 51 años, lo que significa que muchos equipos y líneas de producción en la	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>	<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>MÉTODO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>POBLACIÓN</b>
	Determinar el Modelo de jerarquización para obtener el tipo de mantenimiento que incrementa la disponibilidad de los molinos de bola en la Compañía Minera Santa Luisa.	Si, elaboramos el modelo de jerarquización para obtener el tipo de mantenimiento permitirá incrementar la disponibilidad mecánica del molino de bolas en la Compañía Minera Santa Luisa.	Disponibilidad mecánica  KPI: Porcentaje = (Tiempo de producción/Tiempo de producción posible)	Descriptivo, analítico y sintético	Número de mineras de la región que cuentan con molino de bolas
	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>		<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>	<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>MUESTRA</b>
		<b>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</b>		Correlacional y básico	

<p>concentradora están envejeciendo. En la planta concentradora, la tasa de utilización mecánica del molino de bola es baja, dado que el Linner (Chaqueta), que es el elemento crítico del molino de bola, por su desgaste prematuro ocasiona que la tasa de utilización mecánica alcance un bajo porcentaje de disponibilidad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Seleccionar la metodología de mantenimiento</li> <li>➤ Evaluar las fallas del molino de bolas</li> <li>➤ Determinar la mejora de disponibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seleccionando la metodología de mantenimiento mediante la matriz AHP se podrá identificar la jerarquía de tipos de mantenimiento.</li> <li>- Evaluando las fallas de los molinos de bolas se podrá definir una jerarquización de fallas desde las más crítica hasta la menos crítica.</li> <li>- Determinando la mejora de la disponibilidad, se logrará crecer en un 15 %</li> </ul>	<p>Tipo de Mantenimiento.</p>		<p>Los molinos de bolas de la Minera Santa Luisa.</p>
---	---	--	-------------------------------	--	---

### ANEXO 3. EVIDENCIAS

Molinos de bolas dentro de la planta concentradora



Reunión de reparto de actividades





Inspección de trabajos



Verificación de cambio de forros

